



IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS, PARA EL DESARROLLO PRÁCTICO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO Y ABIERTO POR MEDIO DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN MODBUS-RTU.

Jeisson Humberto Mahecha Guerra

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá D.C., Colombia

2020

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS, PARA EL DESARROLLO PRÁCTICO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO Y ABIERTO POR MEDIO DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN MODBUS-RTU

Jeisson Humberto Mahecha Guerra

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero en Automatización Industrial

Director (a):
Ingeniero José Germán Gutiérrez

Línea de Investigación:
Automatización industrial de intercambiadores de calor

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá D.C., Colombia
2020

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 2020

DEDICATORIA

Alguna vez alguien dijo “la única manera de hacer un trabajo genial es amar lo que haces”, por tal razón dedico este proyecto a las dos personas que me han enseñado a amar lo que hago, a descubrir que sin constancia, sacrificio y dedicación es imposible alcanzar el éxito y que lo más importante no es la meta sino el recorrido, ya que al fin de cuentas es donde se obtiene sabiduría.

A mis amados padres Humberto Mahecha y Rosa Maria Guerra sin su apoyo y la bendición de Dios no habría logrado ser Ingeniero en Automatización Industrial.

Jeisson Humberto Mahecha Guerra

AGRADECIMIENTOS

Hoy me siento completo y realizado por la oportunidad que me dio primeramente Dios y la vida, de poder llegar a ser profesional. Así mismo le agradezco a la Universidad Antonio Nariño, por darme su apoyo incondicional y colaborar en la elaboración de este proyecto de grado.

Por otro lado, agradezco a mis padres, esposa, hermana, familiares, amigos, y cada una de las personas que aportaron su granito de arena en el desarrollo y realización de este logro.

Agradezco también a mi asesor el ingeniero German Gutiérrez, y al ingeniero Henry Moreno. Por brindarme sus conocimientos, ideas y sobre todo por darme su apoyo para culminar este proyecto de grado con éxito. De igual manera a cada uno de los docentes y a la universidad Antonio Nariño por haber sido parte de mi formación como ingeniero en Automatización Industrial durante estos años.

Solo me queda decir, que estoy inmensamente feliz y orgulloso, de haber dado lo mejor de mí y de haber podido cerrar otro ciclo más en mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRAC.....	12
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3 ALCANCE	16
1.4 ESTADO DEL ARTE	17
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3 MARCO TEORICO	20
3.1 Automatización industrial.....	20
3.2 Protocolos de comunicación industrial	21
3.3 Aspectos generales de la comunicación.....	21
3.4 Codificación del mensaje	21
3.5 Paquete de datos	21
3.6 Temporizado.....	21
3.7 Lazos de control.....	22
3.8 Caracterización del proceso	22
3.9 Control en lazo abierto	22
3.10 Control en lazo cerrado.....	22
3.11 Pirámide de la automatización	22
3.12 Normas físicas	24
3.13 RS-485	24
3.14 Protocolo Modbus.....	24
3.15 Intercambiador de calor.....	24
4 METODOLOGÍA	26
4.1 FASE 1: TEORÍA Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	26
4.2 FASE 2: DISEÑO Y MONTAJE ELÉCTRICO.....	26
4.3 FASE 3: PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN Y PROGRAMACIÓN	26
4.4 FASE 4: MANUAL Y GUÍA DE LABORATORIO	27

4.5	CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	27
4.6	DISEÑO DE PLANOS ELÉCTRICOS Y POTENCIA	30
4.7	ELEMENTOS ELÉCTRICOS.....	30
4.8	DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL TABLERO DE CONTROL BASADO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DISEÑADO.	34
4.8.1	Perforación de gabinete, montaje de riel y canaleta.....	34
4.8.2	Esquema de ubicación y montaje de equipos eléctricos.....	34
4.9	CABLEADO	36
4.9.1	Cableado RS-485	36
4.9.2	Cableado de equipos	37
4.10	PROGRAMACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	38
4.11	PLC.....	39
4.12	Controles de temperatura	42
4.13	DESARROLLO DEL CONTROL PID PARA LA TEMPERATURA DE SALIDA DE AGUA CALIENTE.	44
4.13.1	Función de transferencia	44
4.13.2	Procedimiento para la obtención de datos pantalla HMI	44
4.13.3	Obtención de datos.....	48
4.13.4	Cálculo PID en Matlab.....	52
5	PROGRAMACIÓN DE PID PLC DELTA.....	61
6	DESARROLLO DE INTERFAZ GRÁFICA HMI	68
6.5.1.	Text label	71
6.5.2.	Numeric Display	71
6.5.3.	Numeric Entry.....	72
6.5.4.	Goto Pantalla principal	72
6.5.5.	Button On	73
6.5.6.	Metter visualización.....	74
6.5.7.	Pantalla Control lazo cerrado	74
6.5.8.	Pantalla Lazo de Control Abierto.....	76
6.5.9.	Pantalla PWM.....	77
7	CONFIGURACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	78
8	ANÁLISIS Y RESULTADOS	85
9	CONCLUSIONES.....	96

10 BIBLIOGRAFIA	99
11 ANEXOS	101

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Perforaciones e instalación gabinete.	34
Imagen 2. Esquema de ubicación de elementos eléctricos 1.	35
Imagen 3. Esquema de ubicación de elementos eléctricos 2.	36
Imagen 4. Esquema de ubicación de elementos eléctricos 3.	36
Imagen 5. Cableado HMI y controladores.	37
Imagen 6. Borneras alimentación AC y DC.	38
Imagen 7. DOPSoft Software.	38
Imagen 8. Paramentos de comunicación.	39
Imagen 9. WPLSoft Software.	40
Imagen 10. Parámetros de comunicación.	40
Imagen 11. Tabla de parámetros de configuración.	41
Imagen 12. Parametrización Protocolo en PLC.	42
Imagen 13. Configuración de comunicación controles de temperatura.	43
Imagen 14. Historical Trend Graph.	44
Imagen 15. Details	45
Imagen 16. Numeric Entry.	46
Imagen 17. Clock Macro.	46
Imagen 18. Clock Macro 2.	47
Imagen 19. Exportar USB.	47
Imagen 20. Exportar USB 2.	48
Imagen 21. Modo Manual ON.	48
Imagen 22. Establecer y activar control de temperatura.	49
Imagen 23. PWM Bomba	49
Imagen 24. Bomba agua fría ON.	50
Imagen 25. Valores de temperatura de salida del intercambiador.	52
Imagen 26. Valores de cambio escalón unitario.	53
Imagen 27. Tabla depurada de los datos obtenidos de tiempo, temperatura de tanque agua caliente, temperatura de salida agua caliente, t PWM.	53
Imagen 28. Import Data	54
Imagen 29. Output Signals.	55
Imagen 30. Process Models.	55
Imagen 31. Estimar Modelo de Función de Transferencia.	56
Imagen 32. Valores de función de transferencia según datos importados.	56
Imagen 33. Casilla Model Output	57
Imagen 34. Model Output 79.68% de exactitud.	57
Imagen 35. Data/P1.	58
Imagen 36. Obtención de la función de transferencia.	58
Imagen 37. Obtención de la gráfica función de transferencia.	59
Imagen 38. PID TOOLS.	59
Imagen 39. Grafica PID TOOLS.	60
Imagen 40. Parámetros PID calculados.	60

Imagen 41. Línea de programación 1.	61
Imagen 42. Línea de programación 2	62
Imagen 43. Registros PID.	62
Imagen 44 PID PLC.	63
Imagen 45. PID y PWM Programado.....	64
Imagen 46. Línea de programación 3.	64
Imagen 47. Creación de contador	65
Imagen 48. Determinación del cambio en el tiempo.	65
Imagen 49. Variable de error.....	66
Imagen 50. Error pasado.	66
Imagen 51. Cálculo de valor derivativo.	67
Imagen 52. Modelo 3D del intercambiador.....	68
Imagen 53. Imagen de fondo.....	68
Imagen 54. Propiedades Button.	69
Imagen 55. Indicador Emergencia.....	70
Imagen 56. Dirección Indicador Emergencia.	70
Imagen 57. Dirección Indicador Emergencia 2.....	71
Imagen 58. Dirección PV Control de temperatura 1.	72
Imagen 59. Dirección PV Control de temperatura 2.....	72
Imagen 60. Dirección PV Control de temperatura 3.....	73
Imagen 61. On off Manual control de temperatura.....	73
Imagen 62. Visualizador Meter de temperatura.....	74
Imagen 63. Herramientas de dibujo	75
Imagen 64. ModernPump2.	75
Imagen 65. Esquema Lazo de control cerrado.	75
Imagen 66. Herramientas de dibujo.....	76
Imagen 67. ModernPump.	76
<i>Imagen 68. Esquema Lazo de control abierto.</i>	76
Imagen 69. Pantalla PWM.....	77
Imagen 70. Registro PLC D20.....	78
Imagen 71. Timer ON Bomba Caliente.	79
Imagen 72. Timer OFF Bomba Caliente.	79
Imagen 73. Configuración de tiempo ON y OFF tiempo encendido bomba.	80
Imagen 74. Cambio de estado Bomba Y1.	80
Imagen 75. Llenado de tanque de agua caliente.	81
Imagen 76. Llenado de tanque de agua fría.	81
Imagen 77. Tanque de recirculación de agua caliente.	82
Imagen 78. Establecer temperatura a 35 grados.	82
Imagen 79. Establecer Tiempo ON y OFF para bomba de agua caliente.....	83
Imagen 80. Establecer valor VS.....	83
Imagen 81. Valor de temperatura del sensor de salida de agua caliente.	84
Imagen 82. Esquema de bloques ganancia proporcional.	87
Imagen 83. Diagrama de bloques ganancia KP Y KI.....	88
Imagen 84. Entradas KP, KI Y KD.....	89
Imagen 85. Instrucción PWM.	89
Imagen 86. Diagrama de bloque simplificado.	90
Imagen 87. Respuesta del tiempo de salida.	91
Imagen 88. Valores estimados de Matlap.	91

Imagen 89. Valor de estabilidad.	92
Imagen 90. Aplicación Control PID.....	93
Imagen 91. Control HMI.....	94

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Temperatura de salida de agua caliente.	50
Gráfica 2. Temperatura de salida de agua caliente aplicando escalón unitario.	51
Gráfica 3. t PWM.	51
Gráfica 4. Tiempo de señales discretas.	86
Gráfica 5. Toma de muestras tiempo discreto.	87
Gráfica 6. Tiempo discreto.	88
Gráfica 7, Constante de tiempo.	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del diseño estructural.	27
Tabla 2. Características de los tanques de agua fría, caliente y recirculación.....	28
Tabla 3 Accesorios	28
Tabla 4. Intercambiador de calor	29
Tabla 5. Elementos eléctricos.....	30

RESUMEN

El propósito de este proyecto es implementar un sistema de control automatizado aplicado a un intercambiador de tubos concéntricos con el que cuenta la Universidad Antonio Nariño, integrando un lazo de control de la temperatura del agua de salida y un lazo de control para el accionamiento de los actuadores que intervienen en el sistema.

La búsqueda e investigación del funcionamiento del intercambiador de tubos concéntricos permiten caracterizar de forma teórica la función de transferencia para aplicar el sistema de control adecuado, además de su respuesta rápida a perturbaciones externas de salida, para posteriormente aplicarlo en la programación interna del PLC.

Así mismo bajo esta investigación se diseñó los tanques que contienen el agua fría y caliente, además del sistema de tuberías y puntos de medición de las variables de temperatura a intervenir, las cuales se pueden visualizar por medio de una interfaz en tiempo real y de manera gráfica en la pantalla HMI implementada en el proyecto.

Por consiguiente, se establece un protocolo de comunicación industrial MODBUS-RTU con el estándar de comunicación RS-485, para monitoreo y manipulación del estado de las variables de temperatura en conjunto con los actuadores sirviendo como maestro la pantalla HMI.

A través de los lazos de control implementados, así como la manipulación, funcionamiento y calibración física del dispositivo, se da lugar a la elaboración de dos guías para poner en marcha el equipo, además del paso a paso para establecer un protocolo de comunicación teniendo en cuenta los aspectos generales necesarios para la configuración de los equipos de la marca DELTA.

Finalizando se puede evidenciar la implementación del sistema de control automatizado para el intercambiador, visualizando variables de temperatura en la entrada y la salida, obtención de la función de transferencia del sistema de forma práctica, modificación de las ganancias obtenidas bajo los procedimientos de implementación de control PID, obtención de datos y análisis del sistema.

Palabras Clave: Intercambiador de calor, comunicación, Interfaz, programación, automatización.

ABSTRAC

The purpose of this project is to implement an automated control system applied to a concentric tube exchanger at the Antonio Nariño University, integrating an-output water temperature control loop and a control loop to drive the actuators involved in the system.

The search and investigation of the operation of the concentric tube exchanger allows the theoretical characterization of the transfer function in order to apply the appropriate control system, in addition to its rapid response to external output perturbations, for subsequent application in the internal programming of the PLC.

Likewise, under this research, the tanks that will contain the hot and cold water will be designed, in addition to the piping system and measurement points of the temperature variables to be intervened, which can be viewed through a real-time interface and graphically on the HMI screen.

Consequently, an industrial communication protocol MODBUS-RTU is established with the RS-485 communication standard, for monitoring and manipulating the state of the temperature variables in conjunction with the actuators, serving as the HMI display master.

Through the implemented control loops, as well as the manipulation, operation and physical calibration of the device, two guides are prepared to start the equipment, in addition to the step by step to establish a communication protocol taking into account It has the general aspects necessary for the configuration of the DELTA brand equipment.

Finally, the implementation of the automated control system for the exchanger can be evidenced, displaying temperature variables at the inlet and outlet, obtaining the transfer function of the system in a practical way, modifying the gains obtained under the control implementation procedures PID, data collection and system analysis.

Key Words: Heat exchanger, communication, interface, programming, automation.

1 INTRODUCCIÓN

Gracias a los avances llega el desarrollo de los PLC's que va enfocado inicialmente por la necesidad en la industria automotriz. Debido al cambio constate en la línea de producción se hizo necesario reducir los costos ya que con la tecnología antigua se requería un alambrado mayor de los equipos. De este modo la industrial requería sistemas cada vez más económicos, menos robustos, flexible y fácilmente modificable. En 1968 surgió las primeras máquinas autónomas (APIs o PLCs). Los nuevos autómatas o controles tenían que ser programados cómodamente por los profesionales de mantenimiento e ingenieros, adicionalmente debían durar y resistir bastante tiempo, los cambios en su programación serían muy sencillos. También se solicitaba trabajar en entornos adversos. Por esto se utilizó la técnica de programación familiar y se sustituyó el uso de relés mecánicos por otros de estados sólido. [3]

Teniendo en cuenta estos antecedentes se hace de vital importancia desarrollar proyectos de investigación que permitan a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica de la Universidad Antonio Nariño, interactuar de forma teórico-práctica con los mecanismos de automatización necesarios en la industria, como lo es un sistema de control automatizado para un intercambiador de calor de tubos concéntricos, para el desarrollo práctico de los sistemas de control de lazo cerrado y abierto por medio de protocolo de comunicación ModBus- RTU que son utilizados en la industria ya que la mayoría de equipos se fabrican con este tipo de canales abiertos a cualquier protocolo.

Este documento se puede evidenciar la automatización de un sistema de control de un intercambiador de calor, Planteando los objetivos necesarios, se realiza la caracterización del intercambiador y su estructura, teniendo presente la teoría en la automatización industrial desde los protocolos de comunicación pasando por lazos de control, normas físicas, hasta protocolo Modbus, se establece realizar un diseño eléctrico, de comunicación y programación de lo modelo planteado, seguido a esto se realiza la implementación iniciando la puesta en marcha del equipo con el levantamiento de datos para realizar los ajustes necesarios para el ajuste del modelo finalizo obteniendo los resultados y conclusiones del proyecto.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La automatización industrial en la actualidad ha permitido integrarse de tal manera que hoy en día podemos obtener información de los procesos en tiempo real, llegando a tal punto de poder integrarlo en equipos móviles, logrando así monitorear las distintas etapas de los procesos. Todo este tipo de avances han permitido que continuamente se implementen nuevos equipos y tecnologías, las cuales permiten establecer comunicaciones entre distintos dispositivos, utilizando como medios los protocolos de comunicación que facilitan la interacción entre equipos y su respuesta al funcionamiento óptimo del equipo.

Estos sistemas de comunicación se han implementado en los procesos industriales y vienen de la mano de los sistemas de control que son programados para que realicen operaciones específicas y continuas de mando, teniendo en cuenta funcionamiento lógico de los procesos.

Por otro lado la configuración lógica necesaria para efectuar la comunicación integral entre equipos es compleja, mucho más cuando sabemos que los fabricantes tienen sus propias reglas definidas en los software que comandan los equipos al momento de programar, obligando al usuario a familiarizarse con el entorno de programación, justamente ahí es donde el estudiante entra a tener dificultades al momento de programar, pues debe conocer a profundidad los aspectos teóricos en contexto con la programación, debe asociarse con la interfaz de programación implementada y debe tener en cuenta que en el mercado existen un sin fin de marcas que cuentan con sus propios sistemas.

En vista a esta problemática se hace necesaria la implantación de un banco de pruebas, donde los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica de la Universidad Antonio Nariño, puedan observar detalladamente de forma teórico-práctica el proceso para establecer un protocolo de comunicación ModBus RTU a nivel de software y hardware, así como la programación del PLC, el detalle del proceso de forma gráfica por medio de HMI, los sistemas de control a lazo abierto y cerrado aplicados a un proceso industrial, como lo es un intercambiador de calor de tubos concéntricos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día la industria de fabricación lleva acabo procesos avanzados y complejos de automatización, los cuales dependen de equipos que bajo técnicas de control logran establecer nuevos métodos de comunicación industrial, llegando a tal punto que es posible monitorear o controlar procesos desde los dispositivos móviles que tanto usamos en nuestro diario vivir, lo cual permite que ramas de la ciencia como la mecatrónica y automatización vallan en un continuo crecimiento a nivel profesional.

Es de saber que en el mercado existe una amplia gama de productos y marcas de PLC y HMI que son indispensables en la industria, pues además de que remplazaron la tediosa lógica de cableado permitieron la fácil intervención de los equipos en aras de mejorar los procesos. Así mismo los fabricantes continuamente brindan actualizaciones tanto de hardware y software permitiendo que la programación sea más amigable en comparación con las anteriores versiones, ya que las compañías han buscado facilitar la interacción con los usuarios, es necesario que los ingenieros en ramas de la automatización o mecatrónica estén al tanto de cada actualización, saber interactuar con los sistemas e interfaces de programación de cada fabricante, pues en la industria o en aplicaciones específicas que necesiten distintos equipos y requieran una programación compleja, deben tener la capacidad de adaptarse a las reglas y métodos para integrar cualquier tipo de comunicación e interrelación entre equipos.

La integración de protocolos industriales ha facilitado la interacción entre distintos equipos que intervienen en el proceso lógico de los dispositivos ModBus RTU, estos van de la mano de técnicas de control, como los sistemas de lazo cerrado y abierto; dado que la industria productiva implica un constante aumento de los niveles de producción manteniendo altos estándares de calidad en el producto final, es necesario que los procesos vayan a una mayor velocidad y que las variables que intervienen estén dentro de valores constantes, minimizando el tiempo de reacción de los mismos. Frente a este panorama surge la necesidad de implementar lazos de control más avanzados como los PID, siendo estos introducidos en muchos de los dispositivos industriales como los PLC para la programación de maquinaria que así lo exijan.

Hasta el momento se enmarcan una serie de beneficios que se obtienen a través de los sistemas de control y de los dispositivos que se entrelazan en comunicación industrial, es de aclarar que va directamente relacionado en distintas ramas de estudio de la ingeniería en general y aún más cuando esté se implementa en un proceso industrial, como lo es un intercambiador de calor de tubos concéntricos, que permite observar el estado actual de cada variable que interviene y el modo de funcionamiento del sistema implementado en forma gráfica.

Finalmente, además de brindar grandes beneficios y aportes a nivel industrial también permite el desarrollo de prácticas a nivel universitario; partiendo de que la Universidad Antonio Nariño ya cuenta con un intercambiador de calor se hace necesario la implementación de un sistema automatizado que permita observar de manera gráfica en tiempo real el estado y respuesta del proceso en lazo abierto y cerrado, además de los procedimientos necesarios para implantar un sistema de comunicación ModBus RTU con los distintos dispositivos que intervienen en el sistema, demostrando así que la implementación de un banco de pruebas enfocado a la automatización industrial avanzada beneficiará a la facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica en los aspectos teórico prácticos de los campos sistemas de control, PLC, comunicaciones industriales y las aplicaciones que se podrían realizar basados en un ejemplo totalmente detallado de los procedimientos que implica implementar un montaje como este proyecto.

1.3 ALCANCE

- Es un dispositivo que permite visualizar en tiempo real un control de lazo cerrado por medio del HMI.
- Este tendrá implementada una pantalla que permite visualizar un control de lazo abierto para el accionamiento de cada actuador que intervenga en el equipo.
- El diseño estructural de los tanques del intercambiador se realizará bajo aspectos básicos para funcionamiento y no bajo criterios teóricos con cálculos complejos encaminados a ingeniería mecánica.
- Se empleará un software libre propio de cada dispositivo.
- Será un complemento perfecto para un laboratorio ya que integra desde aspectos de ingeniería mecánica como de automatización industrial.
- Con las guías se busca que el estudiante cuente con procedimientos necesarios a nivel global para establecer una comunicación y programación con distintos equipos.

1.4 ESTADO DEL ARTE

A Comienzos del siglo XVII, iniciaron a aplicarse las primeras ideas sobre autómatas a la industria textil. Ese fue el instante en el que se dijo que había iniciado la mecanización de la mano de obra con la automatización industrial. Inicialmente en el siglo XVIII comenzó el proceso de automatización industrial con el ingeniero James Watt que demostró la eficiencia de diseñar y aplicar un regulador centrífugo de velocidad en el control de máquinas a vapor que con el tiempo fueron detectando problemas requiriendo más precisión. La solución tardó cierto tiempo, debido a la falta de una teoría sobre control. Llegando Maxwell en 1868 a implementar una base teórica seria en contexto con el control lógico de procesos. [1]

La segunda guerra mundial dio paso a la aparición de grandes sistemas de generación eléctrica dando como resultado sistemas automatizados más complejos así empezó a deslumbrarse la detención de la industria, por el aumento de confusión y rigor de las instalaciones y maquinas, así como la ausencia del control adecuado en los sistemas. Por otro lado, estaba la gestión de las empresas, que a medida que aumentaba el número de piezas de un producto, implicaba un papeleo y una inteligente comunicación verbal [2]; la posible solución de estos problemas vino con la aparición de los computadores de la mano con un gran avance en las técnicas de la teoría moderna de control.

Para solventar algunos de los problemas que presentaban las anteriores normas, la IEC definió un nuevo estándar de comunicación: la RS-485. Introducida en 1983, es una versión mejorada de la RS-422. Siendo este el modo de comunicación hoy en día más utilizado en la industria y sobre todo en los sistemas de control en los que interviene PLC, HMI y controladores en general, siendo estos indispensables para las industrias de alimentos, petroleras, químicos, farmacéuticos y energéticos en aspectos de calefacción, refrigeración y pasteurización. [5]

En Colombia llegó y se consolidó la automatización en la industria en la ciudad de Bogotá en los años 30 y 50 con las empresas de loza y tejido de algodón, lo cual tomaron ventaja de las grandes montañas y gran riqueza hídrica para mover diferentes maquinas como tornos y telares mediante la rueda de paletas movidas por la energía hidráulica desarrollada. Surgió entonces el sector de las ferreterías, pequeñas industrias y fábricas de hierro, martinetes, fundición y refinación. En la población de pacho Cundinamarca en 1827, donde la instalación, de este capital fijo inicial exigió la asociación de embrionarios capitales que provinieron de las minas de sal, esmeraldas, oro, plata, y del comercio [6]. Ya con la llegada del primer computador al país por parte la histórica cervecera Bavaria que importó el enorme y pesado IBM 650 dando un gran salto a la innovación en los procesos de manufactura y paso a que otras empresas como Rafael del Castillo y Compañía, Manuelita, JGB, ETB, ESPECTADOR, entre otras requiriendo una mayor demanda en equipos ya automatizados [7]; llegando a tal punto que para el año 2020 se

proyecta que el grado de automatización en el sector empresarial colombiano será de entre el 25% al 30%, lo cual implica un enorme reto en materia de apropiación de la tecnología y mejoramiento de las competencias de los empleados. [8].

Teniendo en cuenta estos antecedentes se hace de vital importancia desarrollar proyectos de investigación que permitan a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica de la Universidad Antonio Nariño, interactuar de forma teórico-práctica con los mecanismos de automatización necesarios en la industria, como lo es un sistema de control automatizado para un intercambiador de calor de tubos concéntricos, para el desarrollo práctico de los sistemas de control de lazo cerrado y abierto por medio de protocolo de comunicación ModBus-RTU.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de control automatizado para un intercambiador de calor de tubos concéntricos con corriente de fluido, para el desarrollo práctico de los sistemas de control de lazo cerrado y abierto interviniendo en la manipulación de variables de temperatura del agua, accionamiento de bombas que transportan líquido frío y caliente respectivamente por medio de la HMI en protocolo de comunicación ModBus-RTU.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar el estado actual del intercambiador de calor de tubos concéntricos, comprobando el funcionamiento y la caracterización física basada en la toma de información presente en documentación entregada por la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica de la Universidad Antonio Nariño.
2. Diseñar los planos eléctricos de potencia y control del sistema.
3. Implementar un tablero de control basado en el sistema eléctrico diseñado.
4. Establecer los parámetros de comunicación para el protocolo ModBus RTU, implementar el protocolo de comunicación y configuración necesaria para la interacción entre el PLC, HMI y los controladores de temperatura.
5. Programar un sistema de control PID que permita controlar la temperatura del agua de salida y por medio del control por PWM el flujo de la bomba en la que circula agua fría, el cual permite manipular y visualizar la temperatura del líquido caliente dentro del tanque como también; la temperatura de salida del agua fría del intercambiador.
6. Programar un sistema de control abierto para el accionamiento manual de las bombas que recircula el agua fría y caliente.
7. Desarrollar la interfaz gráfica en la pantalla HMI para la visualización en tiempo real del estado de cada elemento de medición y actuador caracterizado esquemáticamente como un sistema de control abierto y cerrado.
8. Elaborar el manual de operación del banco de pruebas y a su vez dos guías de laboratorio que permitan al estudiante establecer un protocolo y la programación de un control a lazo abierto y cerrado.

3 MARCO TEORICO

3.1 Automatización industrial

The purpose of this project is to implement an automated control system applied to a concentric tube exchanger at the Antonio Nariño University, integrating an output water temperature control loop and a control loop to drive the actuators involved in the system.

The search and investigation of the operation of the concentric tube exchanger allows the theoretical characterization of the transfer function in order to apply the appropriate control system, in addition to its rapid response to external output perturbations, for subsequent application in the internal programming of the PLC.

Likewise, under this research, the tanks that will contain the hot and cold water will be designed, in addition to the piping system and measurement points of the temperature variables to be intervened, which can be viewed through a real-time interface and graphically on the HMI screen.

Consequently, an industrial communication protocol MODBUS-RTU is established with the RS-485 communication standard, for monitoring and manipulating the state of the temperature variables in conjunction with the actuators, serving as the HMI display master.

Through the implemented control loops, as well as the manipulation, operation and physical calibration of the device, two guides are prepared to start the equipment, in addition to the step by step to establish a communication protocol taking into account It has the general aspects necessary for the configuration of the DELTA brand equipment.

Finally, the implementation of the automated control system for the exchanger can be evidenced, displaying temperature variables at the inlet and outlet, obtaining the transfer function of the system in a practical way, modifying the gains obtained under the control implementation procedures PID, data collection and system analysis.

Así mismo el término de automatización abarca distintos niveles en los cuales se ven definidos en la llamada pirámide de automatización:

- Nivel de campo: En este encontramos todos los equipos y actuadores que responden al funcionamiento físico de la máquina.
- Nivel de control: En este nivel se encuentran todos los dispositivos de control como los son PLC, HMI, DTC, DRIVES, variadores entre muchos otros.
- Nivel de Supervisión: En este están los sistemas encargados de integrar todos los dispositivos de control que intervienen a fin de poder supervisar y controlar en tiempo real los procesos.
- Nivel de gestión: Es el nivel más alto, se controlan a nivel global la integración de los sistemas de manufactura, gestionando monitorios continuos.

3.2 Protocolos de comunicación industrial

La interacción integrada de los distintos niveles de la automatización se realiza bajo los protocolos de comunicación que se establezcan, ya que estos son un conjunto de reglas que permiten la transferencia e intercambio de datos entre los distintos equipos y dispositivos que intervienen en el sistema.

3.3 Aspectos generales de la comunicación

Cualquier medio de comunicación está fundamentado en tres aspectos en común, emisor, receptor y canal y están determinados bajo los protocolos con respecto a las reglas que se establecen; a fin de realizar una comunicación eficaz se configura cual es el emisor, receptor, el idioma, velocidad, formato, tamaño del mensaje y requisitos de confirmación estén determinados.

3.4 Codificación del mensaje

Ya que estén definidos el formato y elementos anteriores, este mensaje se convierte en bits caracterizando un patrón específico, para que finalmente sea codificado y entregado al receptor.

3.5 Paquete de datos

Se envía por tramas de datos permitiendo la recepción de estos por paquetes, además de la dirección y destino de origen de la cual se envía y hacia dónde va dirigido respectivamente.

3.6 Temporizado

Además de los aspectos anteriores se establece un flujo de envío controlado de los datos con respecto a un tiempo establecido evitando así la saturación de los elementos enviados dando paso a la correcta recepción de estos.

3.7 Lazos de control

Sistema de elementos dirigidos a la respuesta de condiciones específicas dentro de un proceso automatizado.

3.8 Caracterización del proceso

Los sistemas tienen un modelo matemático el cual es importante caracterizar a fin de conocer la respuesta ante estímulos externos que afecten los elementos de control en el proceso.

Estas funciones de transferencias pueden ser expresadas de varias maneras caracterizadas como diagramas de bloques o modelos dinámicos.

3.9 Control en lazo abierto

Estos se caracterizan por que las variables en el proceso intervienen directamente a la salida de control esperando que se cumpla una función específica.

3.10 Control en lazo cerrado

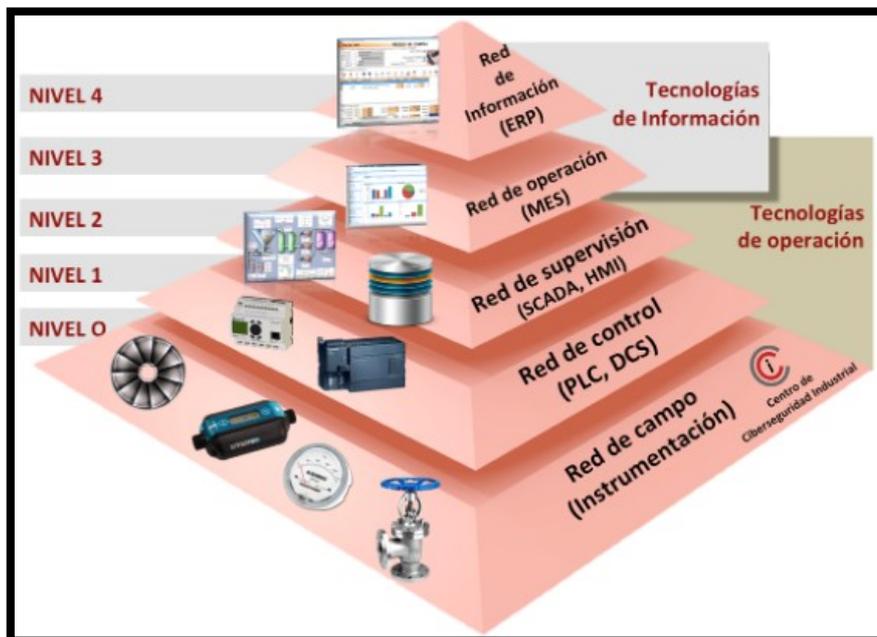
A diferencia del control en lazo abierto este cuenta con una realimentación desde la salida del proceso hacia la acción de entrada del control, permitiendo así verificar las acciones que se le indican a los actuadores.

3.11 Pirámide de la automatización

En la automatización de los procesos industriales uno de los aspectos que ha evolucionado es la integración de varias tecnologías desde la eléctrica, mecánica hasta la electrónica, informática, telecomunicaciones etc. [14]

La unión de estas tecnologías se llama pirámide de la automatización esta recoge los niveles tecnológicos que se pueden encontrar en la industria. Estas tecnologías se encuentran entre sí, su interacción se efectúa en cada nivel y en diferentes niveles dentro de los diferentes estándares de comunicación. En la imagen 1 se puede observar esta interacción.[14]

Imagen 1. Pirámide de automatización.



[Citado el 06 de abril de 2020] Disponible en

<https://www.smctraining.com/es/webpage/indexpage/311>

- El primer nivel o "nivel de campo" incluye los dispositivos físicos presentes en la industria, como los actuadores y sensores. [14]
- El segundo nivel o "nivel de control" incluye los dispositivos controladores como ordenadores, PLCs, PIDs, etc. [14]
- El "nivel de supervisión" (tercer nivel) corresponde a los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). [14]
- En un nivel superior o "nivel de planificación" se encuentran los sistemas de ejecución de la producción (MES). [14]
- La cúspide de la pirámide ("nivel de gestión") la componen los sistemas de gestión integral de la empresa (ERP). [14]

3.12 Normas físicas

Dentro lo que es el nivel físico del modelo OSI, y al igual que otros aspectos de la comunicación, el enlace de datos también se encuentra normalizados, las principales normas utilizadas son [5]:

- RS232
- RS422
- RS485

3.13 RS-485

Es considerada como una interfaz de comunicación multipunto permitiendo la comunicación de hasta 32 emisores- receptores en su BUS de datos; además de ser un sistema diferencial que permite mitigar los ruidos electromagnéticos.

Este canal de comunicación se caracteriza por tener:

- Dos hilos con referencia a tierra.
- Los datos se obtienen bajo la diferencia de la señal eléctrica en los dos hilos.
- Cada equipo envía y recibe, pero no de forma simultánea.
- Velocidades de comunicación de hasta 10Mbps y distancias de 1200 metros.
- 32 estaciones de trabajo.

3.14 Protocolo Modbus

Modbus es un protocolo de comunicaciones, basado en el tipo de arquitectura maestro/esclavo, diseñado para el trabajo con controladores lógicos programables PLC. [15]

Este protocolo se adapta a nivel industrial ya que goza con mayor disponibilidad para la interconexión entre equipos electrónicos; así mismo la codificación de datos dentro de la trama puede hacerse en modo ASCII o en modo binario RTU. [15]

3.15 Intercambiador de calor

El sistema de intercambiador de calor es usado para refrigerar un fluido que está a una temperatura más elevada que lo deseado, de este modo transfiriendo una temperatura superior a un fluido que esta frio y que requiere ser calentado. La transferencia de calor se realiza a través de una pared metálica o de un tubo que separa ambos fluidos. [16]

A continuación, las distintas y variadas aplicaciones utilizadas con un intercambiador de calor:

- Intercambiador de Calor: Realiza la función doble de calentar y enfriar dos fluidos.
- Condensador: Condensa un vapor o mezcla de vapores.
- Enfriador: Enfría un fluido por medio de agua.
- Calentador: Aplica calor sensible a un fluido.

- Rehervido: Conectado a la base de una torre fraccionadora proporciona el calor de ebullición que se necesita para la destilación. (Los hay de termosifón, de circulación forzada, de caldera).
- Vaporizador: Un calentador que vaporiza parte del líquido. [16]

4 METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se divide en 4 fases, que se enlistan a continuación:

4.1 FASE 1: TEORÍA Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

En primer lugar, se busca la documentación necesaria para observar y comprender el funcionamiento del intercambiador de tubos concéntricos basados en:

- la información del documento de tesis brindado por la facultad, del diseño del intercambiador.
- seguido a esto se toma medidas del dispositivo del laboratorio y basados en estas se implementa dos tanques uno contiene el agua fría y otro el agua caliente, el cual lleva una resistencia para complementar el intercambiador de tubos concéntricos.
- En segundo lugar, se instala los tanques, el sistema estructural de tuberías, bombeo y medición; después se ensambla para así someter el sistema a pruebas con el fin de descartar alguna avería o fuga.

4.2 FASE 2: DISEÑO Y MONTAJE ELÉCTRICO

A continuación, se crea el diseño eléctrico de potencia, control y comunicación necesario para realizar el respectivo montaje en el dispositivo, teniendo en cuenta los elementos de control necesarios para el funcionamiento y medición como los sensores, PLC, variadores entre otros.

- Basados en la planimetría se compran los elementos eléctricos previstos primando siempre que estos cuenten con puertos de comunicación RS485.
- Posterior se debe hacer el montaje eléctrico tomando como base el plano establecido procurando que las instalaciones cumplan la norma eléctrica RETIE. Llegados a este punto se instalan dichos elementos en el dispositivo, se ejecutan las pruebas de funcionamiento de los actuadores y demás elementos eléctricos que intervienen.
- Una vez realizadas las pruebas y garantizando el correcto funcionamiento, se crean los parámetros de comunicación para establecer conexión con el PLC, HMI, los controles de temperatura y ejecutar el respectivo protocolo en cada dispositivo según manual.

4.3 FASE 3: PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

A continuación, se determina el tipo de sistema de control que permita controlar el valor de temperatura deseada:

- En este caso se opta por el método PID o bien ON/OFF; además de la implantación de un lazo de control abierto para manipular los actuadores del sistema. Establecido lo anterior y con base a las teorías de control se modela la función de transferencia que es caracterizada por el intercambiador de calor bajo la información recolectada en los procesos anteriores,
- posteriormente se desarrolla la programación en el PLC.

- A continuación, se realiza la interfaz en la pantalla HMI, caracterizando de manera gráfica el sistema de control, el valor de las temperaturas y el accionamiento manual. Al parametrizar todo el sistema, se prosigue a poner en marcha el dispositivo, observar su comportamiento y realizar los respectivos ajustes físicos necesarios para poner en óptimo funcionamiento el intercambiador de calor.

4.4 FASE 4: MANUAL Y GUÍA DE LABORATORIO

Ya para finalizar se diseñan dos guías de laboratorio teniendo en cuenta todo lo aprendido en la interacción con el equipo, buscando que el estudiante pueda poner en marcha el equipo, además de establecer un protocolo y la programación de un control a lazo abierto y cerrado.

4.5 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

La caracterización que se plantea está basada bajo la estructura y dimensiones que posee el intercambiador, está centralizado y ubicado estratégicamente con los tanques que contiene el agua fría y el agua caliente respectivamente.

A continuación, se enlistan los materiales de la estructura, sus características y dimensiones.

Tabla 1. Características del diseño estructural.

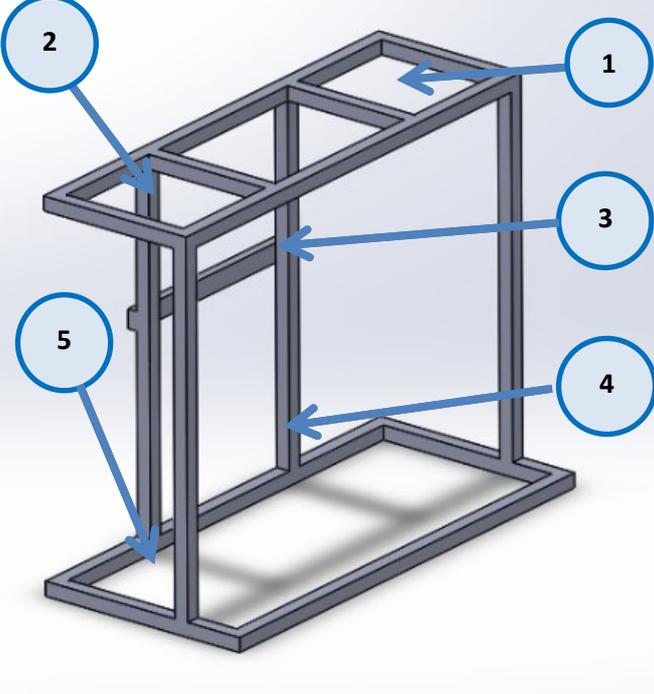
Estructura	Características
 <p>El diagrama muestra una estructura metálica de color gris con un diseño de marcos. Se ven cinco componentes numerados en círculos azules con flechas que los señalan: 1. Tanque de agua caliente (parte superior derecha), 2. Tanque de agua fría (parte superior izquierda), 3. Tablero eléctrico (centro de la estructura), 4. Intercambiador de calor (parte inferior central), y 5. Tanque de salida de agua caliente (parte inferior izquierda). La estructura tiene un soporte trasero y un espacio abierto para el montaje de componentes.</p>	Ancho: 1000 mm
	Alto: 800 mm
	Ancho tubería: 30 mm
	Espesor lámina: 2 mm
	1. Tanque agua caliente
	2. Tanque agua fría
	3. Tablero eléctrico
	4. Intercambiador de calor
	5. Tanque salida agua caliente
	La estructura cuenta con dos parales a los extremos para sostener el tanque de agua fría y caliente, así mismo cuenta con un soporte trasero para empotrar el gabinete de control dejando el espacio suficiente para el montaje del intercambiador las bombas y el recipiente de salida de agua caliente.

Tabla propia del Autor

Tabla 2. Características de los tanques de agua fría, caliente y recirculación.

Tanques	Características
	Altura = 28 cm
	Radio = 15 cm
	Volumen = 19792 cm ³
	Litros = 19 Litros
	<p>Los tanques cuentan con un acople para manguera de 3/8" los cuales dosifican el agua y conectan a las bombas.</p> <p>El tanque de agua caliente cuenta con un soporte para la resistencia, encargada de calentar el agua como también la termocupla que sensa el valor de temperatura del agua.</p>
	Largo = 14 cm
	Alto = 30 cm
	Ancho = 36 cm
	Volumen = 15120 cm ³
	<p>Litros = 15 Litros</p> <p>Tanque de salida de agua caliente donde entra manguera para recircular agua a tanque que contiene el líquido caliente.</p>

Tabla propia del autor

Tabla 3 Accesorios

Accesorios	Características
	Acople para manguera 3/8"

	<p>Válvula llave de paso cierre cromada hembra- hembra 3/8"</p>
	<p>Te galvanizada 3/8" rosca interna</p>
	<p>Racor B68 3/16" X 3/8" Npt</p>
	<p>Manguera atóxica mallada 3/8" (10 mm) para conexiones hidráulicas entre tanques y bombas. Largo = 3 m</p>

Tabla 4. Intercambiador de calor

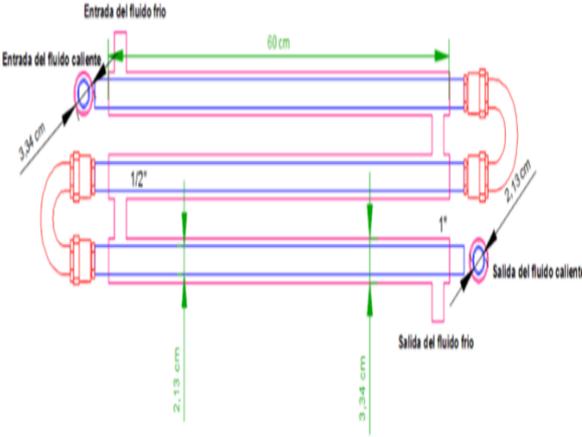
Intercambiador de Calor	Características
	<p>Largo = 180 cm</p>
	<p>Diámetro tubo interno = 1/2 "</p>
	<p>Diámetro tubo externo = 1"</p>
	<p>Volumen agua interno = 304 cm³</p>
	<p>Volumen agua externo = 993 cm³</p>
<p>Se realiza el montaje del intercambiador en la estructura buscando que la presión del flujo que transita por los tubos sea llevada por gravedad.</p>	

Tabla propia del autor

4.6 DISEÑO DE PLANOS ELÉCTRICOS Y POTENCIA

Se diseñan los planos eléctricos correspondientes al circuito de control, potencia y sistema hidráulico, se enlistan según anexo:

- Plano potencia – Anexo F1 PLANO DE POTENCIA
- Plano control – Anexo F2 PLANO DE CONTROL
- Plano Comunicación – Anexo F3 PLANO DE COMUNICACIÓN

4.7 ELEMENTOS ELÉCTRICOS

A continuación, se enlistan todos los elementos que intervienen en el control eléctrico del intercambiador de calor.

Tabla 5. Elementos eléctricos.

Bomba de agua	Características
	Modelo= SWP-2212
	Voltaje = 12 VDC
	Potencia = 25 W
	A = 0.8 – 1.2 A
	P = 0.8 MPa
	Q = 2 – 3 L/m
Breaker	Características
	Modelo= Chint EB
	Borne porta fusible 2.5 mm
	Voltaje = 110 V
	Polos = 1 P

<p style="text-align: center;">Portafusibles</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p> <p>Borne porta fusible 2.5 mm Fusible 0.5 A</p>
<p style="text-align: center;">PLC</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p> <p>Modelo = DVP12SS11T2</p> <p>Puntos MPU: 14 (8DI + 6DO)</p> <p>Puerto COM: Puertos RS-232 y RS-485 integrados, compatibles con el protocolo Modbus ASCII / RTU. Puede ser amo o esclavo.</p> <p>Salida de pulso de alta velocidad: admite 4 puntos (Y0 ~ Y3) de salida de pulso independiente de alta velocidad (máx. 10kHz)</p> <p>Admite el autoajuste PID: DVP-SS2 guarda los parámetros automáticamente después de que se completa el autoajuste de temperatura PID.</p> <p>24 VDC salida a transistor</p>
<p style="text-align: center;">Control de temperatura</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelo = DTC1000 – DTC2000 • PID / On-Off / entrada manual / modos de control programables. • 2 grupos de salidas para autoajuste 2 • grupos de parámetros PID. • Capaz de conectarse a varios termopares (B, E, J, K, L, N, R, S, T, U, TXK), RTD de platino (PT100, JPT100), corriente analógica (0 ~ 20mA, 4 ~ 20mA) y voltaje lineal (0 ~ 5V, 0 ~ 10V) • Interfaz de comunicación RS-485 incorporada (Modbus ASCII, RTU, velocidad de transmisión: 2,400 ~ 38,400) 3 niveles de protección con contraseña.

<p style="text-align: center;">HMI</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelo = DOP-103BQ • CPU Cortex-A8 800MHz • 512 MB de RAM • 256 MB de ROM • 1 puerto COM / 1 puerto COM de extensión • Tiempos de prensado:> 10,000K veces 24 VDC • 4.3 "(480 * 272) 65,536 colores TFT
<p style="text-align: center;">Fuente 24VDC</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelo = EBCHQ 43376 • Input = 110/220 VCA • Out = 24 VDC 1.5 A • P = 35 W
<p style="text-align: center;">Fuente 12VDC</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelo = EBCHQ LP1025D-12 • Input = 100/220 VCA • Out = 12VDC 2.1 A • P = 25 W

Relevo	Características
 <p>A photograph of a grey WAGO 857-304 DIN rail terminal block. It features five screw terminals labeled A1+, A2-, T1, T2, and T3. The block is designed for DIN 35 rail mounting and includes technical specifications such as '500 DC', '500V AC', and '60°C'.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo = 857-304 • Tensión de entrada nominal DC 24 V • Corriente nominal de entrada en 10 mA • Limitación de corriente continua 6 A • 5 pines • Max. voltaje de conmutación AC 250 V • Tipo de montaje Riel DIN-35
Relé de estado solido	Características
 <p>A photograph of a blue OPTEC TD48A- solid state relay. The front panel shows an input terminal labeled '4' and two output terminals labeled '1' and '2'. The text on the relay includes 'INPUT 4-32 VDC', 'OPTEC SOLID STATE RELAY', and 'TD48A-'. It also features a CE mark and a small diagram of a relay symbol.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo=TD48A40-VI • Input = 4-32 VDC • Output = 40 A/ 24-575 VCA
Relé de estado solido	Características
 <p>A photograph of a black KUDOM KSJ solid state relay. The front panel shows a load terminal labeled '1' and '2+', and an input terminal labeled '4' and '3+'. The text on the relay includes 'LOAD', 'KUDOM KSJ SOLID STATE RELAY', 'FK47', and 'INPUT'. It also features a CE mark and a small diagram of a relay symbol.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo =TD48A40-VI • Input = 4-32 VDC • Output = 200 VDC 10 A

Tabla propia del autor.

4.8 DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL TABLERO DE CONTROL BASADO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DISEÑADO.

4.8.1 Perforación de gabinete, montaje de riel y canaleta

Se realizan perforaciones para los siguientes elementos eléctricos:

- HMI

Dimensiones de perforación: 120 x 93 mm

- Piloto, muletilla, pulsador y paro de emergencia.

Dimensiones de perforación: 22 mm

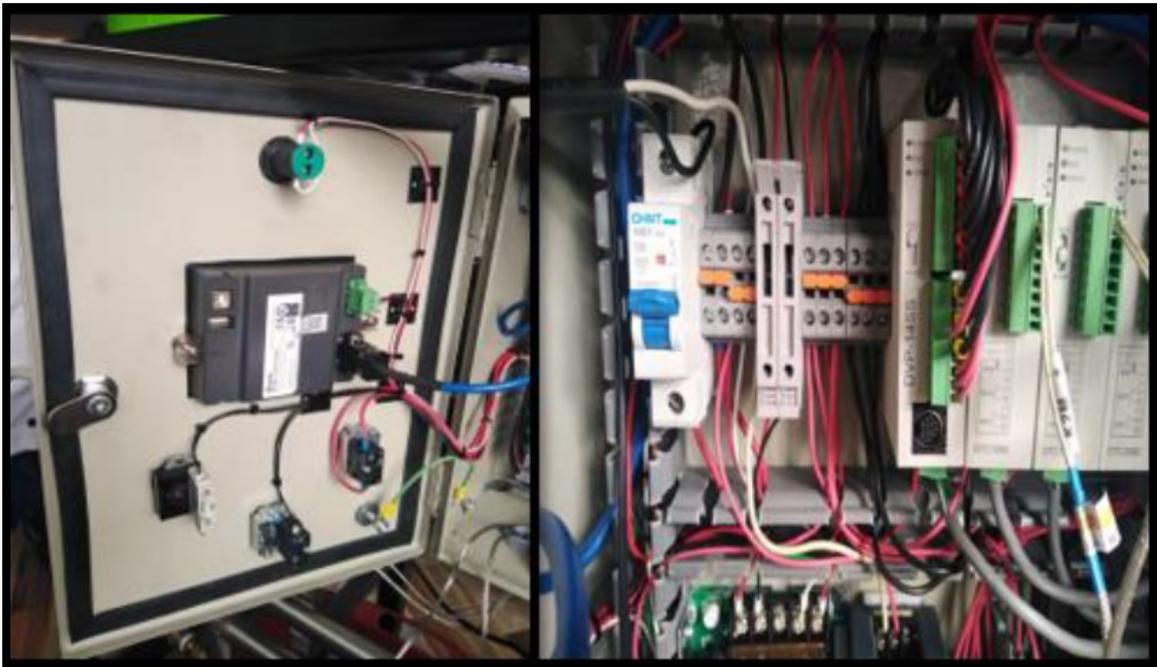
- Prensa cables.

Dimensiones de perforación: PG16 22 mm

A continuación, se realiza montaje de riel y canaleta en bandeja de gabinete como se puede observar en la imagen 1.

- Canaleta 25 x 40 mm
- Riel omega.

Imagen 1. Perforaciones e instalación gabinete.



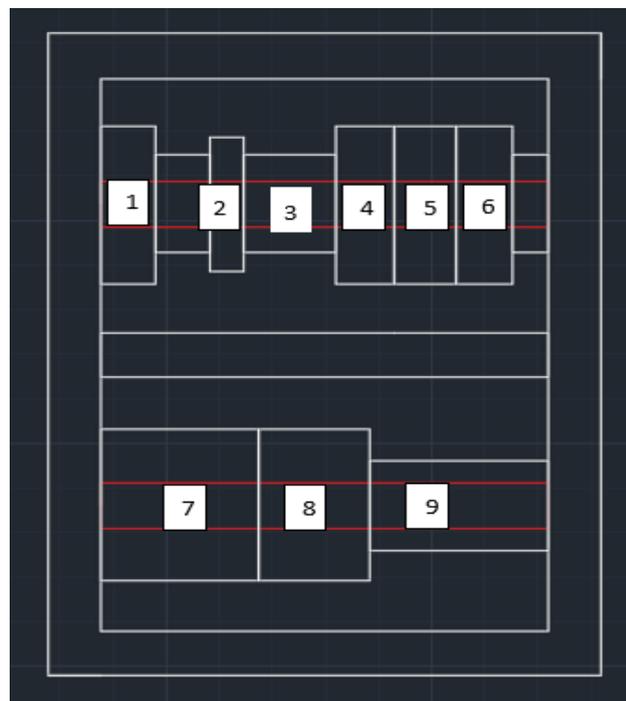
Presentación propia del autor.

4.8.2 Esquema de ubicación y montaje de equipos eléctricos.

Montaje en bandeja de equipos los cuales se pueden observar en las imágenes 2, 3 y 4:

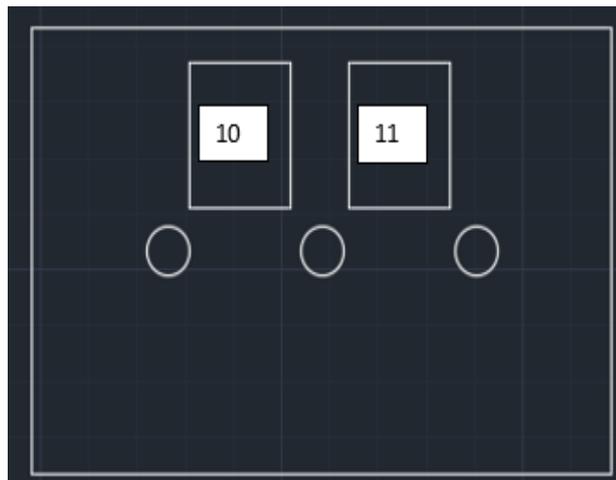
1. Breaker CHINT C6
2. Borneras 25 mm
3. Portafusibles de vidrio
4. PLC DVP-14SS11T2
5. DTC1000
6. DTC2000
7. Fuente 24 VDC
8. Fuente 12 VDC
9. Relévo 24 VDC – 6 AMP
10. Relévo SSR OUT AC
11. Relévo SSR OUT DC
12. HMI DOP
13. Muletilla 2 posiciones
14. Pulsador
15. Piloto verde
16. Paro emergencia

Imagen 2. Esquema de ubicación de elementos eléctricos 1.



Presentación propia del autor.

Imagen 3. Esquema de ubicación de elementos eléctricos 2.



Presentación propia del autor.

Imagen 4. Esquema de ubicación de elementos eléctricos 3.



Presentación propia del autor.

4.9 CABLEADO

4.9.1 Cableado RS-485

- Terminal DV9 HMI
- D+ Verde
- D- Blanco Verde

Imagen 4. Cableado puerto COM.

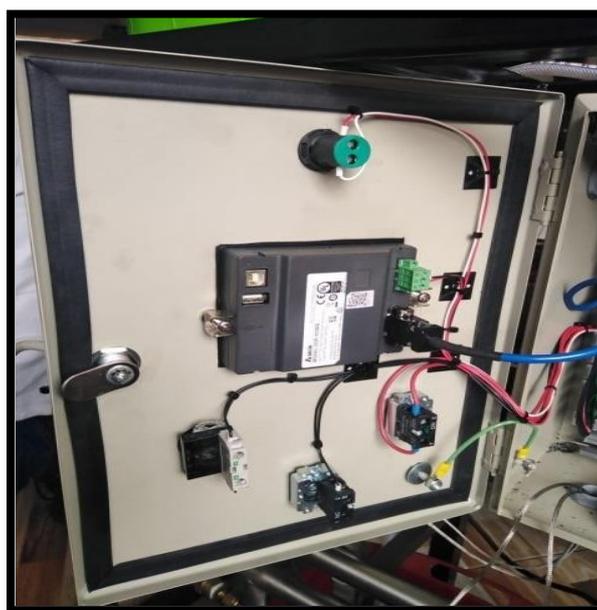
DOP-B03S211 / DOP-B03E211 COM1 ve COM2 Portları							
COM Port	PIN	MOD1		MOD2		MOD3	
		COM1	COM2	COM1	COM2	COM1	COM2
		RS-232	RS-485	RS-485	RS-485	RS-232	RS-422
	1			D+			TXD+
	2	RXD				RXD	
	3	TXD				TXD	
	4		D+		D+		RXD+
	5	GND		GND		GND	
	6			D-			TXD-
	7	RTS					
	8	CTS					
	9		D-		D-		RXD-

[Citado el 11 de octubre de 2019] Disponible en < <http://3.bp.blogspot.com/-DwXO1OfSMfo/VfnJpPJRIul/AAAAAAAAAnY/2V-c9Fa3OGw/s1600/haberle%25C5%259Fme%2Bpinler.PNG> >

4.9.2 Cableado de equipos

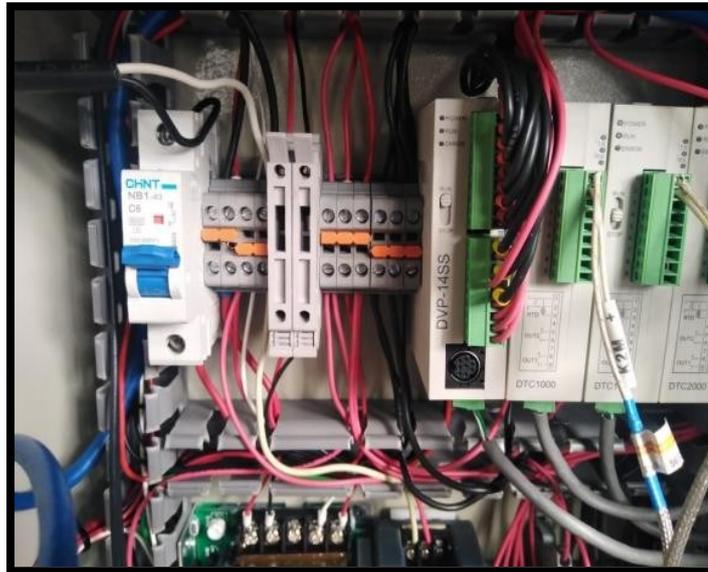
Se ejecuta el montaje eléctrico teniendo presente el diseño en el esquema eléctrico realizado y montaje mecánico de los equipos. A continuación, en la imagen 5 e imagen 6 se puede evidenciar.

Imagen 5. Cableado HMI y controladores.



Presentación propia del autor

Imagen 6. Borneras alimentación AC y DC.

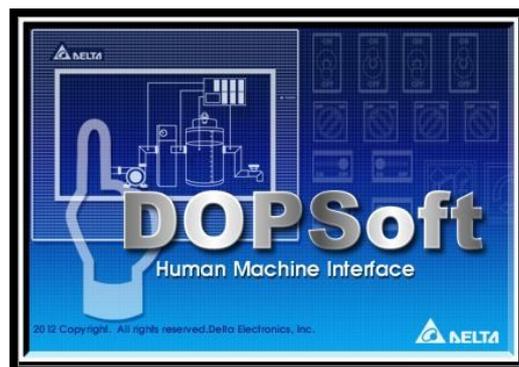


Presentación propia del autor

4.10 PROGRAMACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

DOP SOFT es el software de la pantalla imagen 7 quien facilita la programación de cada dispositivo ya que desde este se direcciona a cada parámetro dependiendo el dispositivo al cual se vaya a intervenir, en este caso los controles de temperatura.

Imagen 7. DOPSoft Software.



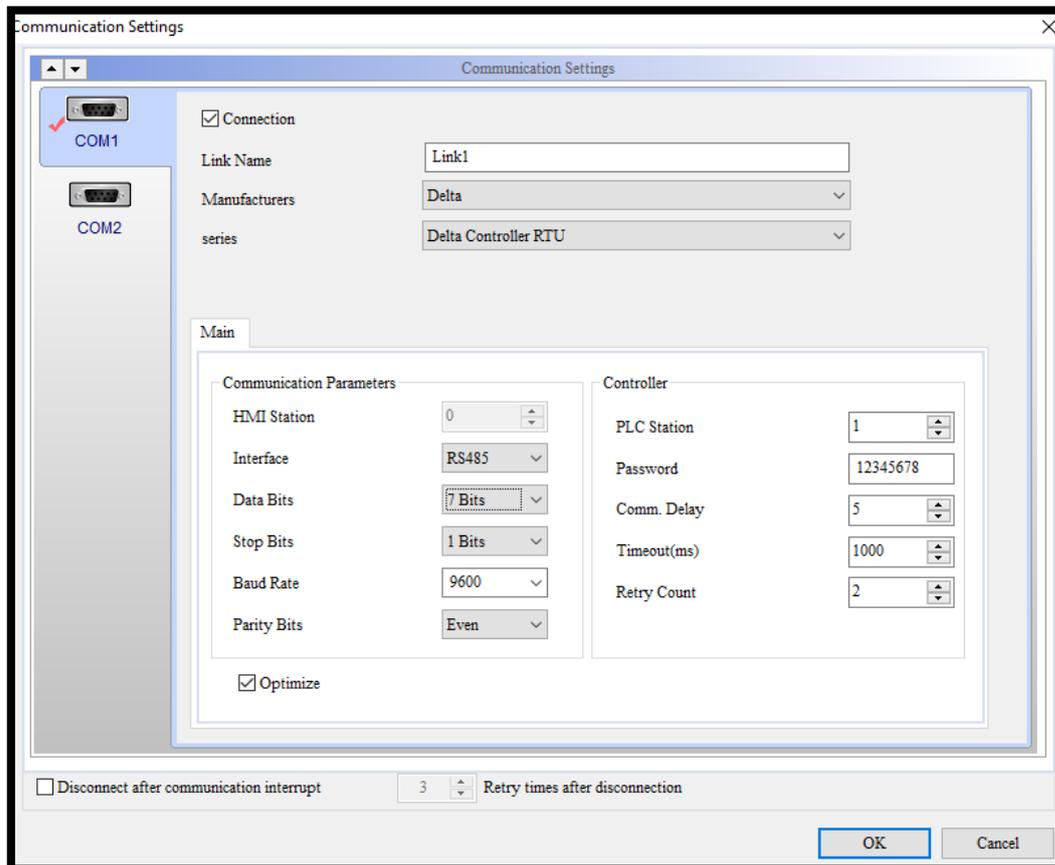
Presentación propia del autor.

Como se observa en la imagen 8 se asignan los siguientes parámetros (7, E, 1) COM1 en la barra de herramientas "Communication Settings":

- Link name = Link1 (Nombre del puerto de comunicación)
- Manufactures = Delta (Productos DELTA)
- Serie = (RTU – ASCII)
- Interfaz = RS485 (Canal de comunicación)

- Data bits = 7 (Trama de datos)
- Stop bits = 1 (bits de parada)
- Baud Rate = 9600 b/s (Velocidad de comunicación)
- Parity bits = Even (Bits de paridad)

Imagen 8. Paramentos de comunicación.



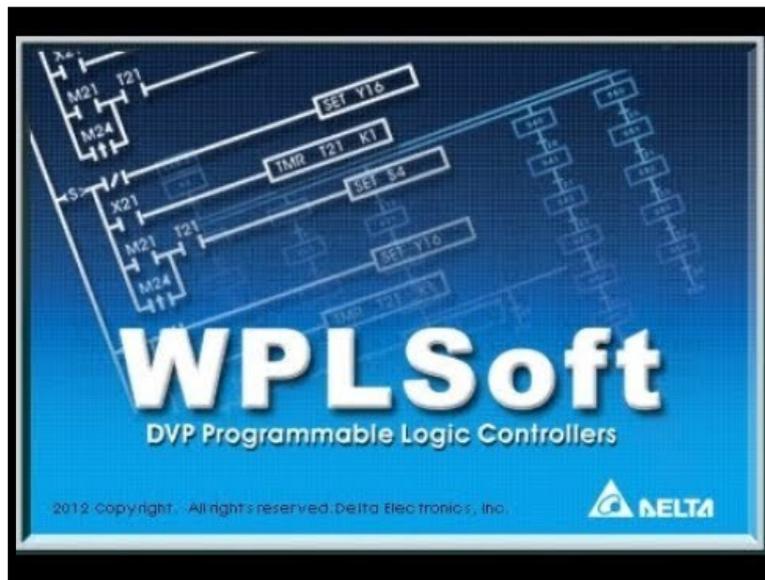
Presentación propia del autor.

La dirección de comunicación de la HMI se asigna por defecto (0).

4.11 PLC

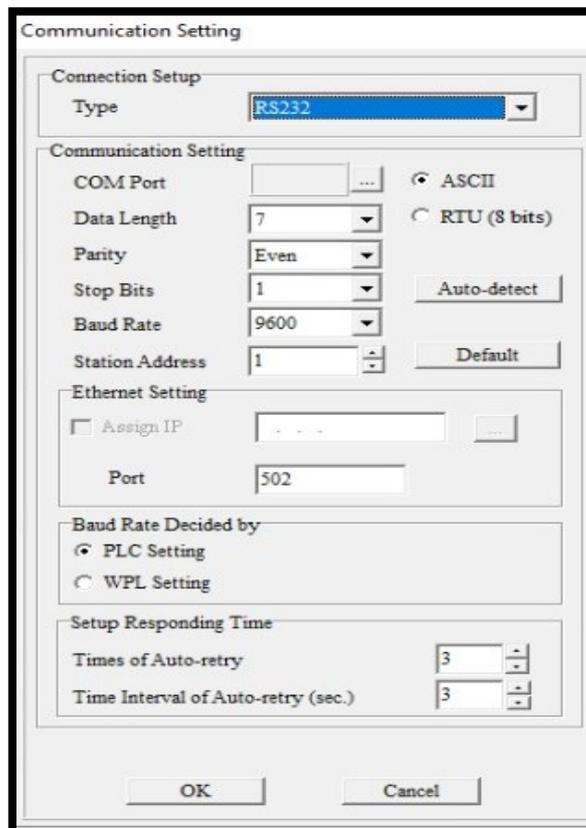
WPL SOFT es el software de programación de toda la línea de PLC DELTA imagen 9, en este se debe determinar el puerto de comunicación que se asigna al momento de conectar el cable de comunicación del PLC al PC como se muestra en la imagen 10 ingresando a la barra de herramientas en la opción "Communication Setting".

Imagen 9.WPLSoft Software.



Presentación propia del autor.

Imagen 10. Parámetros de comunicación.



Presentación propia del autor.

A continuación, se procede a establecer los parámetros de comunicación (7, E,1) como anteriormente se determinó para el HMI, es así como se debe apuntar a los siguientes registros y programarlos como se muestra en la imagen 11:

- M1002 Habilitar pulso positivo simple al momento en que se activa RUN (normalmente OFF).
- MOV H86 al registro D1120, este indica (9600, 7, E, 1) como se hace referencia al manual en la imagen 10.

Imagen 11. Tabla de parámetros de configuración.

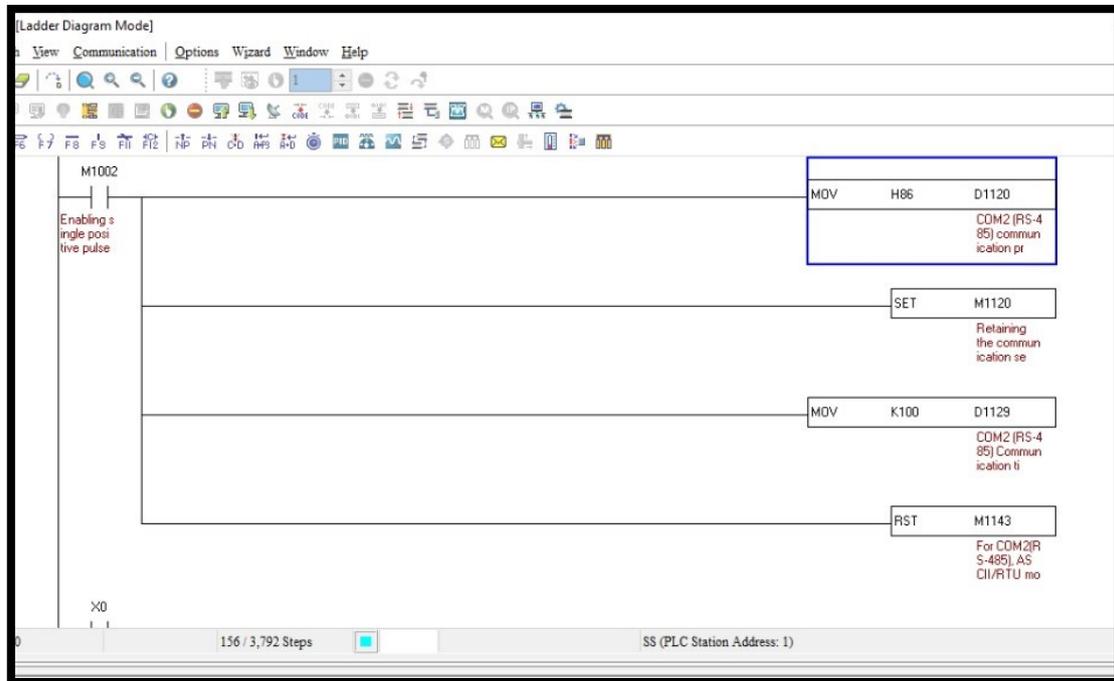
	Contenido																															
b0	Longitud de datos	0: 7 bits de datos, 1: 8 bits de datos (RTU compatible con 8 bits de datos únicamente)																														
b1 b2	Bit de paridad	00: Ninguno 01: Impar 11: Par																														
b3	Bits de parada	0: 1 bit, 1: 2 bits																														
b4 b5 b6 b7	Velocidad de transmisión	<table border="0"> <tr><td>0001(H1):</td><td>110</td></tr> <tr><td>0010(H2):</td><td>150</td></tr> <tr><td>0011(H3):</td><td>300</td></tr> <tr><td>0100(H4):</td><td>600</td></tr> <tr><td>0101(H5):</td><td>1200</td></tr> <tr><td>0110(H6):</td><td>2400</td></tr> <tr><td>0111(H7):</td><td>4800</td></tr> <tr><td>1000(H8):</td><td>9600</td></tr> <tr><td>1001(H9):</td><td>19200</td></tr> <tr><td>1010(HA):</td><td>38400</td></tr> <tr><td>1011(HB):</td><td>57600</td></tr> <tr><td>1100(HC):</td><td>115200</td></tr> <tr><td>1101(HD):</td><td>500000 (COM2 / COM3)</td></tr> <tr><td>1110(HE):</td><td>31250 (COM2 / COM3)</td></tr> <tr><td>1111(HF):</td><td>921000 (COM2 / COM3)</td></tr> </table>	0001(H1):	110	0010(H2):	150	0011(H3):	300	0100(H4):	600	0101(H5):	1200	0110(H6):	2400	0111(H7):	4800	1000(H8):	9600	1001(H9):	19200	1010(HA):	38400	1011(HB):	57600	1100(HC):	115200	1101(HD):	500000 (COM2 / COM3)	1110(HE):	31250 (COM2 / COM3)	1111(HF):	921000 (COM2 / COM3)
0001(H1):	110																															
0010(H2):	150																															
0011(H3):	300																															
0100(H4):	600																															
0101(H5):	1200																															
0110(H6):	2400																															
0111(H7):	4800																															
1000(H8):	9600																															
1001(H9):	19200																															
1010(HA):	38400																															
1011(HB):	57600																															
1100(HC):	115200																															
1101(HD):	500000 (COM2 / COM3)																															
1110(HE):	31250 (COM2 / COM3)																															
1111(HF):	921000 (COM2 / COM3)																															
b8	Seleccionar bit de inicio	0: Ninguno 1: D1124																														
b9	Seleccionar el 1º bit final	0: Ninguno 1: D1125																														
b10	Seleccionar el 2º bit final	0: Ninguno 1: D1126																														
b11–b15	No definido																															

Presentación propia del autor.

- M1120 Contener la programación de comunicación. La programación de comunicación se restablece de acuerdo con la información en D1120 después de cada ciclo de investigación. El programador establece M1120 a ON si el protocolo de comunicación requiere ser retenido. Cuando M1120 = ON, la configuración de comunicación no se restablece (cambia) cuando los parámetros de comunicación se procesan, si el contenido en D1120 es cambiado.

- MOV K100 M1129 espacio de espera. Si el usuario configura el valor de tiempo de espera en D1129 y el espacio de recepción de datos excede el valor de tiempo, M1129 esta ON.
- RST Selección de modo ASCII / RTU. ON: modo RTU, OFF: modo ASCII.

Imagen 12. Parametrización Protocolo en PLC.



Presentación propia del autor.

La dirección de comunicación del PLC se asigna por defecto (1).

Establecer los parámetros de comunicación para el protocolo ModBus RTU, implementar el protocolo de comunicación y configuración necesaria para la interacción entre el PLC, HMI y los controladores de temperatura.

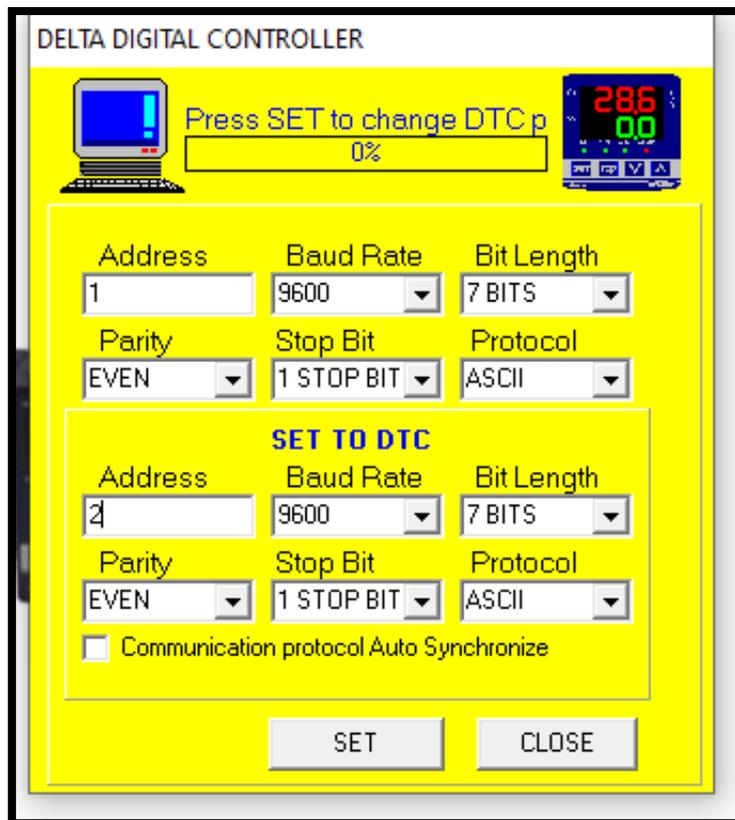
4.12 Controles de temperatura

DTCOM es el software de programación y simulación de los controles de temperatura, con se establece con los mismos criterios de comunicación que se definieron anteriormente, con la diferencia que en este asigno la dirección correspondiente a cada dispositivo en la imagen 12 se observa la interfaz del software.

Se asignan los siguientes parámetros (7, E, 1), ingresando al menú de herramientas “DTC SET” como se indica en la imagen 13:

- Addres: 2 para control de temperatura DTC1000 el cual es el encargado de recibir la temperatura de salida del agua caliente.
- Addres: 3 para control de temperatura DTC2000 el cual es el encargado de recibir y controlar la temperatura del tanque de agua caliente.
- Addres: 4 para control de temperatura DTC1000 el cual es el encargado de recibir la temperatura de salida del agua fría.

Imagen 13. Configuración de comunicación controles de temperatura.



Presentación propia del autor.

4.13 DESARROLLO DEL CONTROL PID PARA LA TEMPERATURA DE SALIDA DE AGUA CALIENTE.

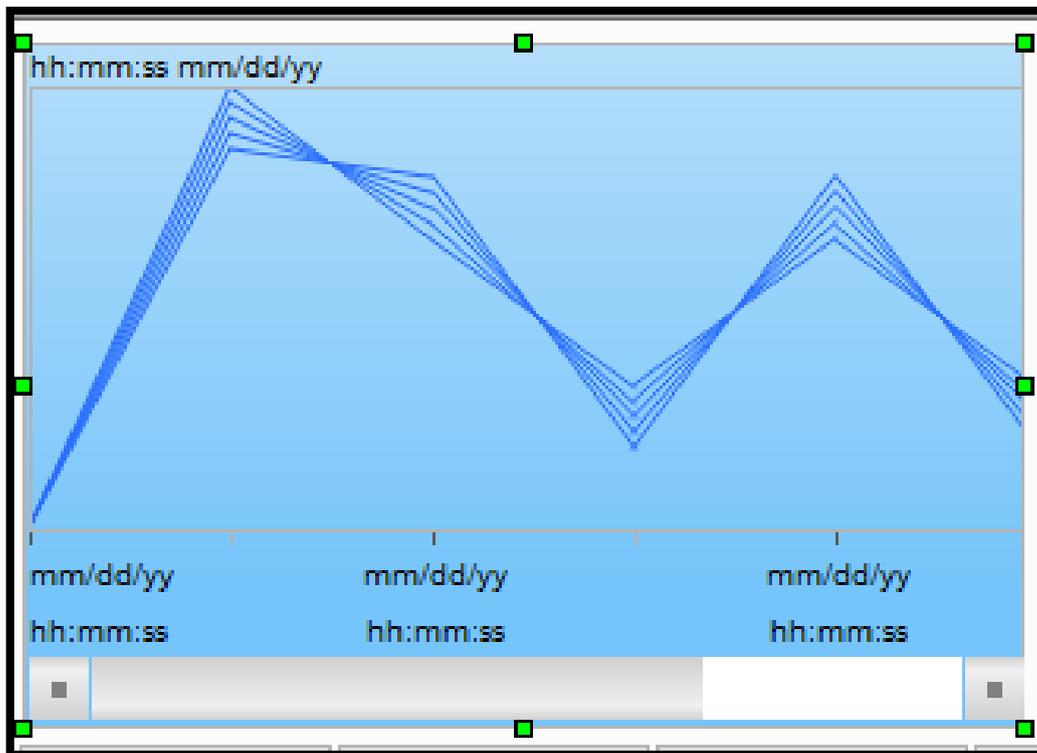
4.13.1 Función de transferencia

A continuación, se obtiene la función de transferencia a partir de datos experimentales, para eso primero se obtiene a partir de la respuesta dinámica de un sistema a un cambio escalón, seguido a esto se usa estos datos para calcular la ganancia y la constante de tiempo.

4.13.2 Procedimiento para la obtención de datos pantalla HMI

Por medio de la barra de herramientas en la opción "History" se agrega un "Historical Trend Graph", este permite graficar como se puede observar en la imagen 14 una variable en tiempo real.

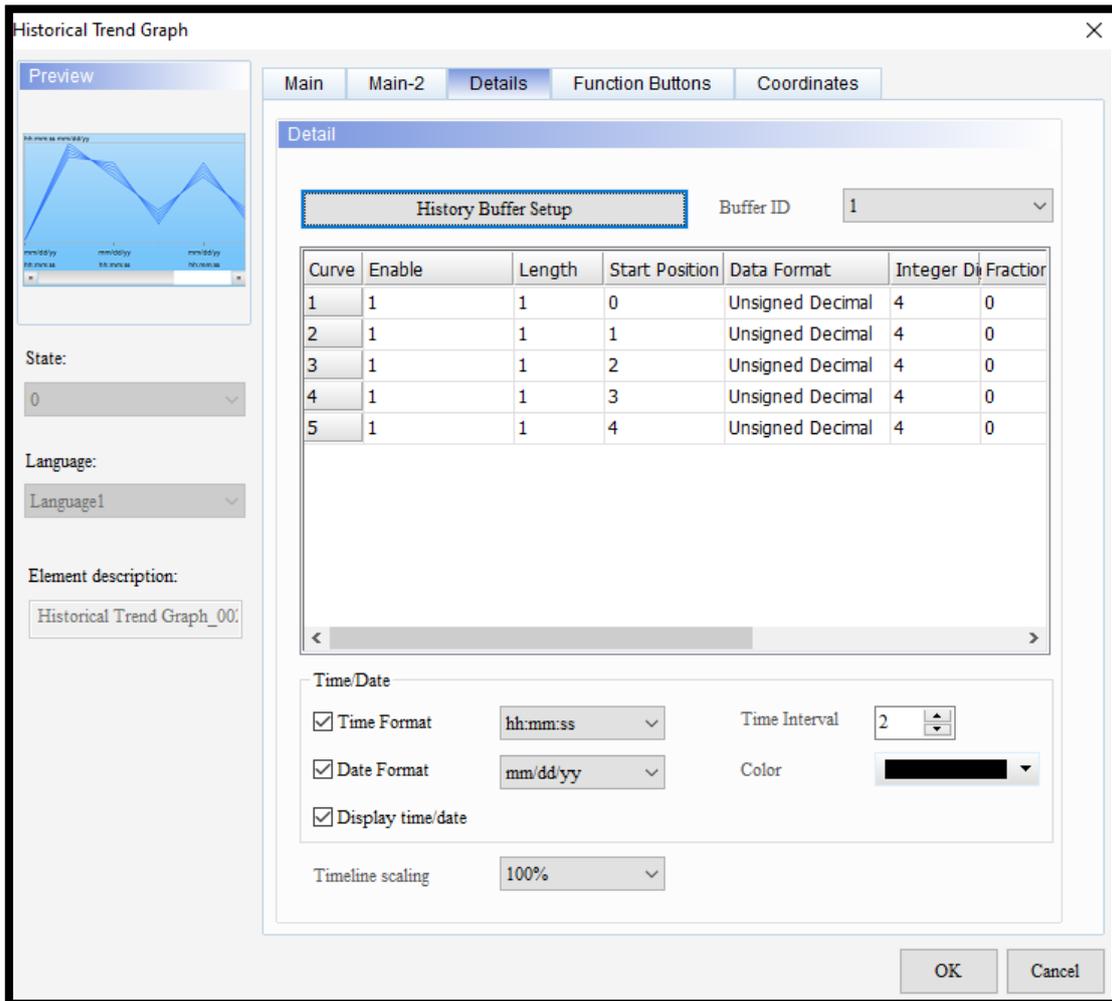
Imagen 14. Historical Trend Graph.



Presentación propia del autor.

Ya en el menú en la pestaña "main" se agregan 3 curvas para posterior direccionarlas a las variables de temperatura de salida de agua caliente y temperatura de agua fría, en la imagen 15 se muestra la pestaña "Details" la configuración que por defecto realiza el programa.

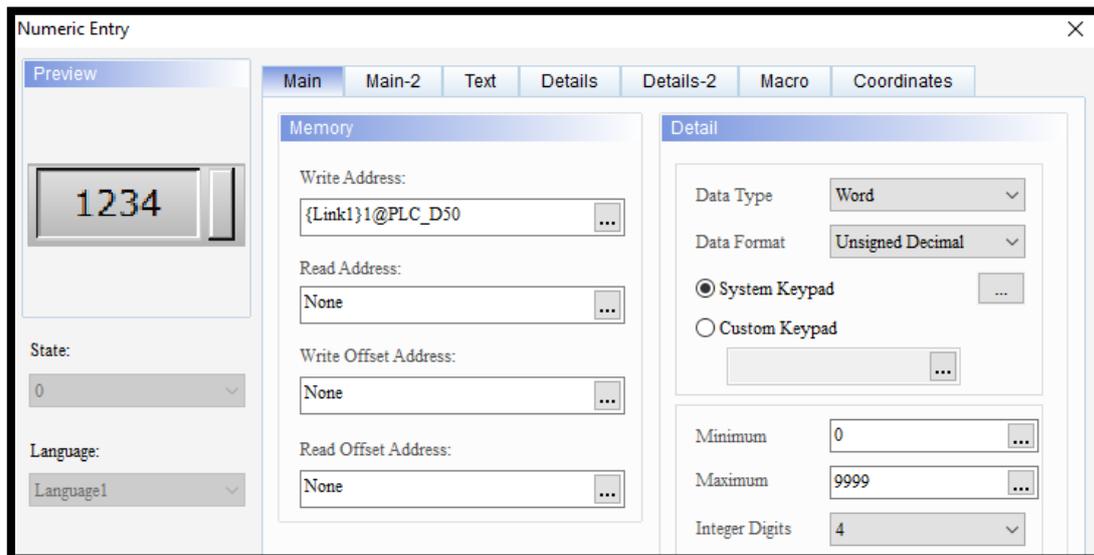
Imagen 15. Details



Presentación propia del autor.

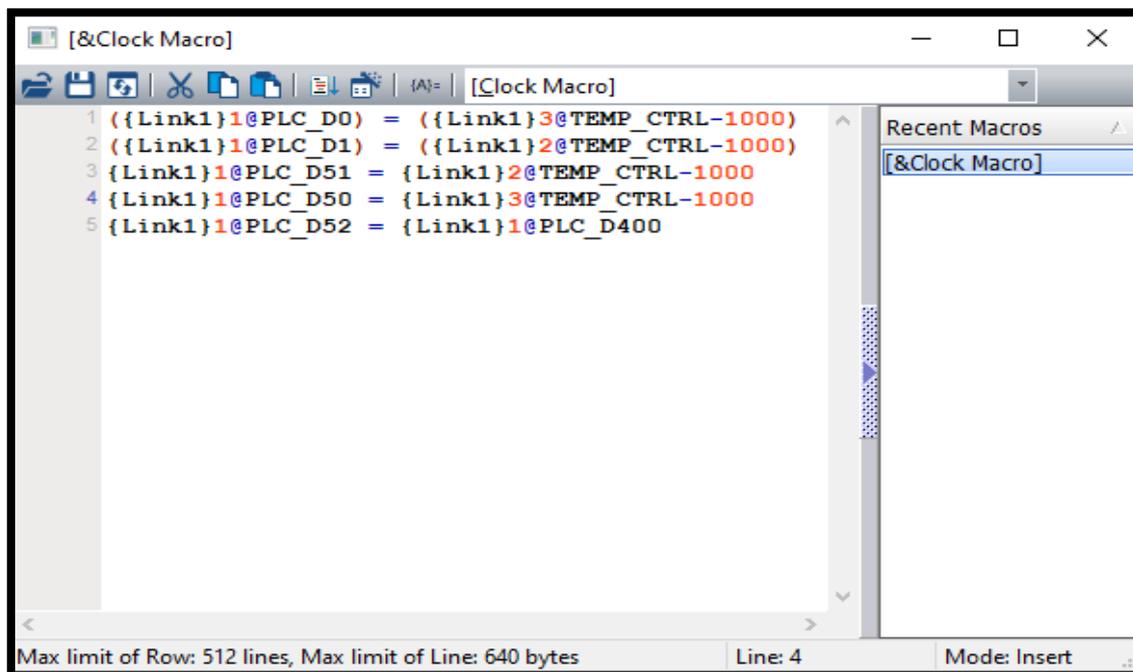
Se agrega un "Numeric Entry" apuntando a la dirección del PLC D50 y D51 como se muestra en la imagen 16, seguido a esto se programa una clock macro para que continuamente este leyendo el valor de temperatura de las variables {Link1}2@TEMP_CTRL-1000 y {Link1}3TEMP_CTRL-1000 correspondientes a la temperatura de salida del agua caliente y la temperatura del agua del tanque respectivamente imagen 17.

Imagen 16. Numeric Entry.



Presentación propia del autor.

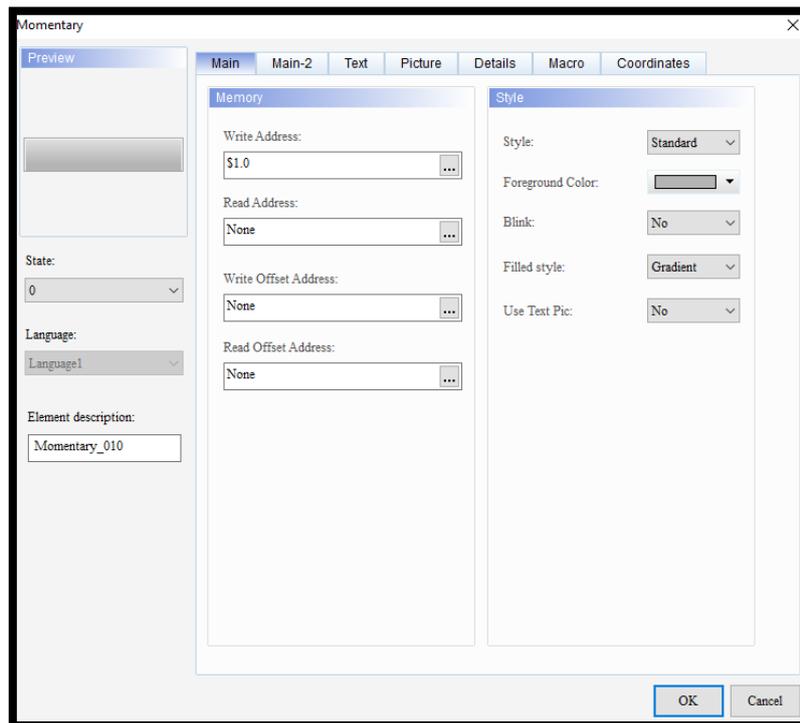
Imagen 17. Clock Macro.



Presentación propia del autor.

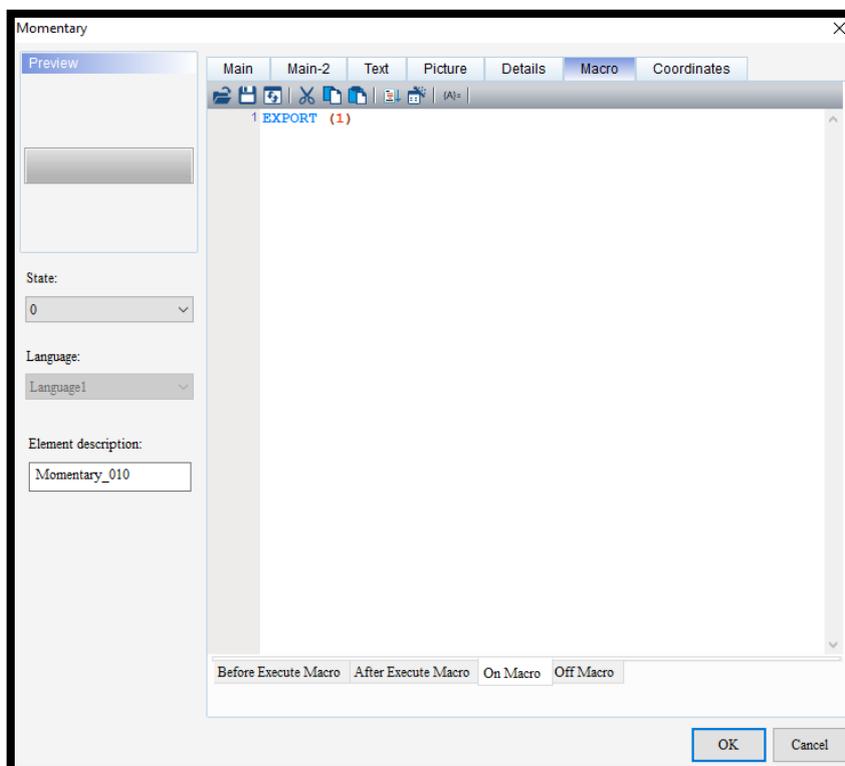
Ahora insertando un botón de tipo “Momentary” que sirve para exportar los datos a la USB dando dirección a la memoria interna de escritura \$1.0 (imagen 18) se crea una macro de tipo “On macro” con la función “EXPORT (1)” que enviará los datos captados en formato csv como se muestra en la imagen 19.

Imagen 18. Clock Macro 2.



Presentación propia del autor.

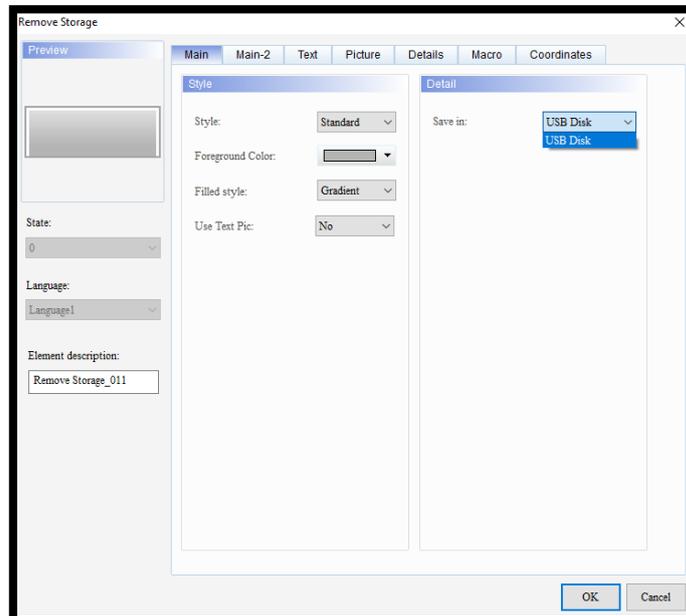
Imagen 19. Exportar USB.



Presentación propia del autor.

Se inserta un botón “Remove storage” para expulsar la USB conforme se guarden los datos en determinado tiempo imagen 20.

Imagen 20. Exportar USB 2.



Presentación propia del autor.

4.13.3 Obtención de datos

Ya estructurado el sistema de graficas se realiza la obtención de datos en tiempo real, obteniendo la respuesta dinámica del sistema a un cambio escalón, se realizan los siguientes pasos:

1. Poner el sistema en modo manual “ON” en la pantalla lazo de control abierto como se muestra en la imagen 21.

Imagen 21. Modo Manual ON.



Presentación propia del autor.

2. En la pantalla control de temperatura se asigna un VP = 40 °C y accionamos el interruptor ON como se indica en la imagen 22.

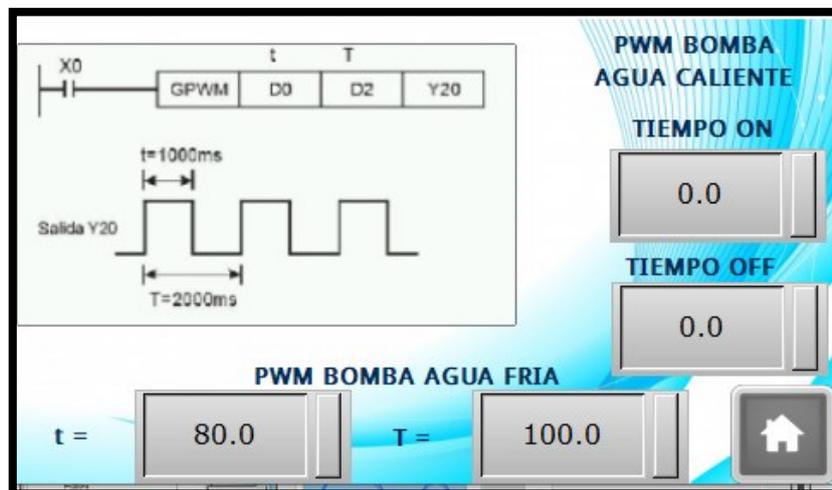
Imagen 22. Establecer y activar control de temperatura.



Presentación propia del autor.

3. Se asigna en la pantalla PWM el tiempo de ciclo en $T = 100.0$ ms (Tiempo total en el que se enciende y apaga la bomba) y $t = 80.0$ ms (Tiempo de activo bomba) siendo T 100% y t 80% de trabajo de la bomba como se muestra en la imagen 23.

Imagen 23.PWM Bomba



Presentación propia del autor.

4. Seguido a esto en la pantalla lazo de control abierto se acciona la bomba de agua fría como indica la imagen 24.

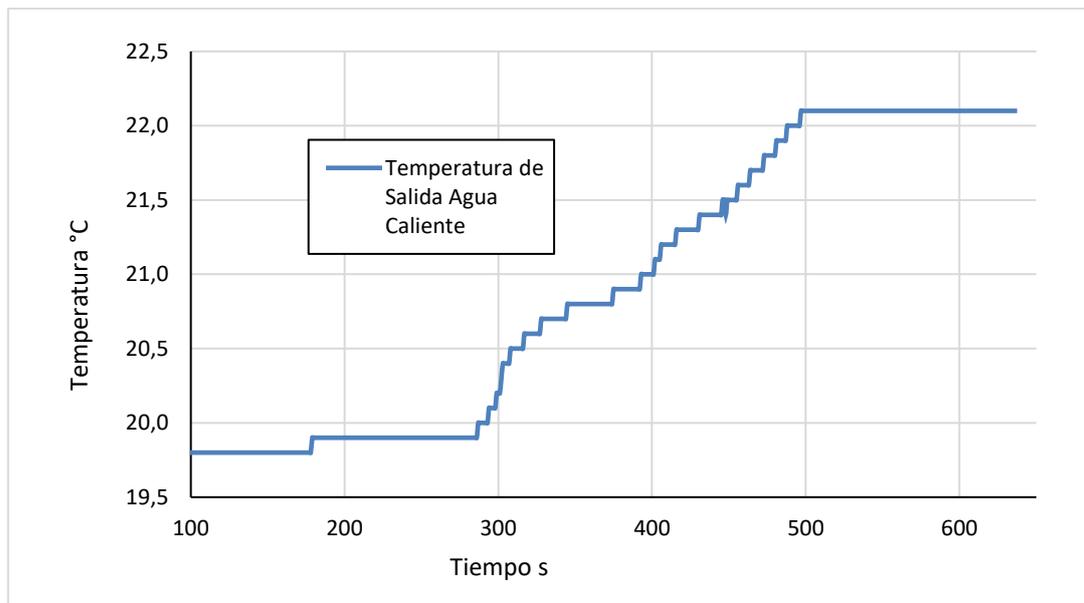
Imagen 24. Bomba agua fría ON.



Presentación propia del autor.

5. Se observa la gráfica 1 los parámetros establecidos y su comportamiento.
6. Se observa inicialmente que la temperatura de salida del agua caliente a una temperatura del agua del tanque de 40°C comienza a ascender de 19.8°C paulatinamente hasta establecerse a 22°C y no presentar ninguna variación de esta temperatura como se observa en la gráfica 1 basada en la toma de datos del Anexo G (DATOS SENSOR EXPERIMENTAL PID).

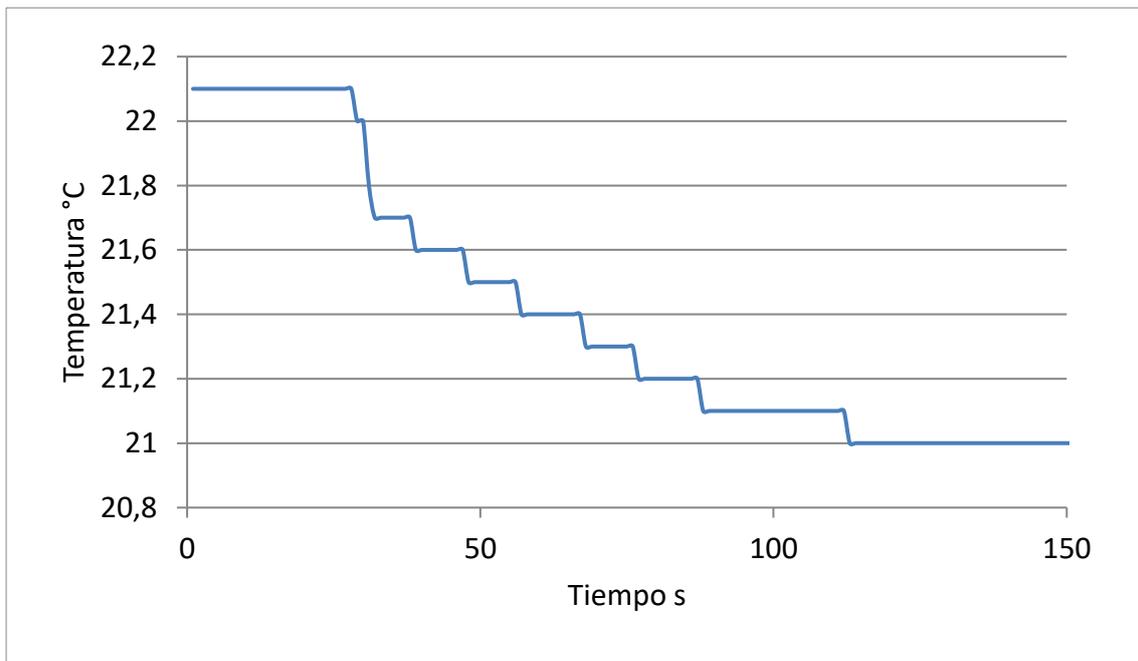
Gráfica 1. Temperatura de salida de agua caliente.



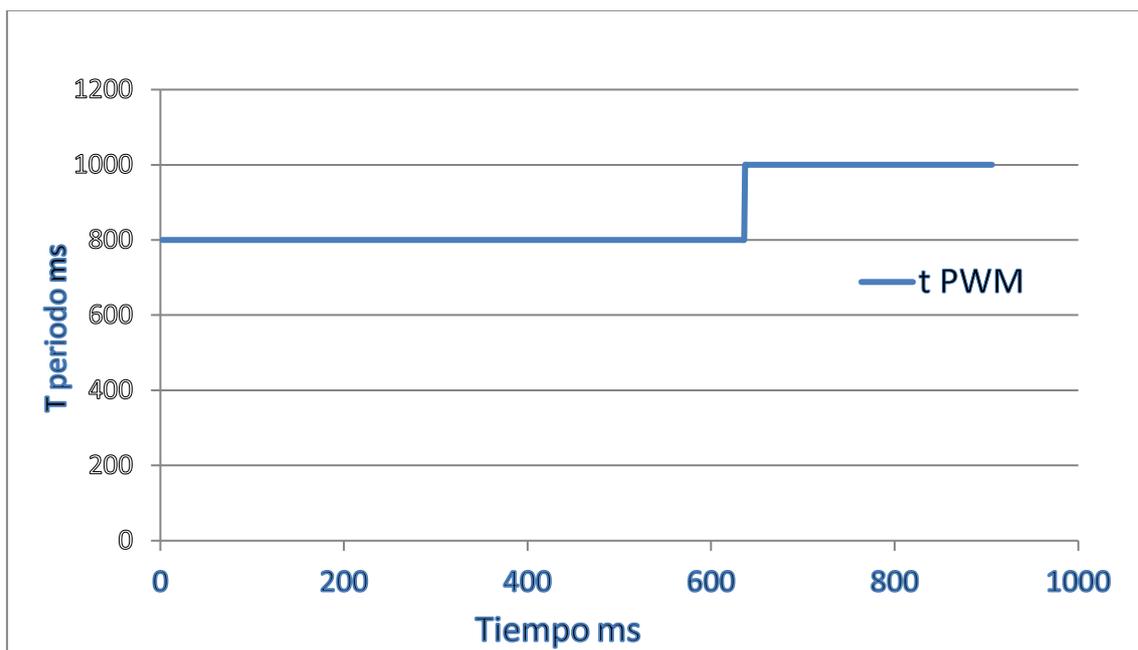
Este aumento de temperatura se da ya que inicialmente está leyendo el valor de temperatura ambiente y este valor aumenta conforme va circulando el agua caliente hasta que se estabiliza un valor de temperatura como se observa en la gráfica 1.

7. Aplicando el cambio escalón pasando el $t = 80.0$ ms a 100.0 ms (gráfica 3) se observa que la temperatura desciende paulatinamente en tiempos largos de asentamiento de 23°C a 21°C como se observa en la gráfica 2 basada en la toma de datos además de la respuesta escalón aplicada del ANEXO G. DATOS SENSOR EXPERIMENTAL PID.

Gráfica 2. Temperatura de salida de agua caliente aplicando escalón unitario.



Gráfica 3. t PWM.



4.13.4 Cálculo PID en Matlab.

Por medio del software de análisis matemático Matlab se realiza el cálculo de la función de transferencia y PID basados en los datos experimentales, a continuación, se enlistan el paso a paso para la obtención de los resultados:

1. Conforme se abra el programa en la barra de herramientas se agrega un “New Variable” y en la hoja de cálculo que allí aparece se agregan los datos arrojados correspondientes al valor de temperatura de salida del agua caliente imagen 25 al igual que los datos arrojados del escalón imagen 26, estos datos son tomados del anexo G en el cual esta segmentado por columnas (Tiempo, Temperatura Tanque agua caliente, Temperatura de Salida Agua Caliente, t PWM).

Imagen 25. Valores de temperatura de salida del intercambiador.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1
22	22.1000											
23	22.1000											
24	22.1000											
25	22.1000											
26	22.1000											
27	22.1000											
28	22.1000											
29	22											
30	22											
31	21.8000											
32	21.7000											
33	21.7000											
34	21.7000											
35	21.7000											
36	21.7000											
37	21.7000											
38	21.7000											
39	21.6000											

Presentación propia del autor.

Imagen 26. Valores de cambio escalón unitario.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1
627	800											
628	800											
629	800											
630	800											
631	800											
632	800											
633	800											
634	800											
635	800											
636	1000											
637	1000											
638	1000											
639	1000											
640	1000											
641	1000											
642	1000											
643	1000											
644	1000											

Presentación propia del autor.

Estos valores obtenidos varían de 19.8°C a 22.1°C antes de que se realice el cambio escalón en el tiempo 634 ms. Al pasar de 800 a 1000 el valor del escalón unitario la temperatura del sistema varía de 22.1°C a 21°C como se observa en la imagen 27 y ANEXO G DATOS TEMPERATURA SALIDA INTERCAMBIADOR, toda esta información esta depurada en el anexo G DATOS TEMPERATURA SALIDA INTERCAMBIADOR.

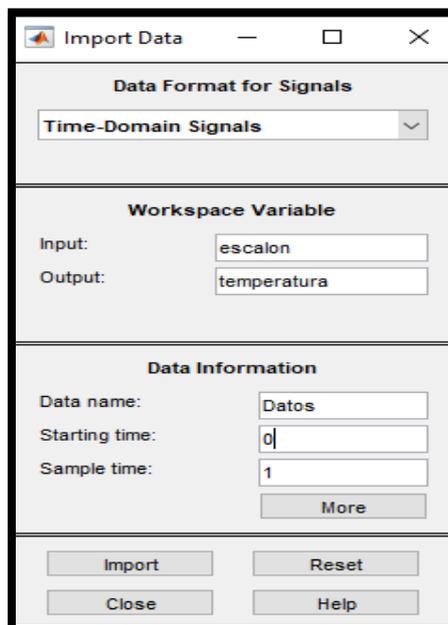
Imagen 27. Tabla depurada de los datos obtenidos de tiempo, temperatura de tanque agua caliente, temperatura de salida agua caliente, t PWM.

	B	C	D	E
	Tiempo (ms)	Temperatura Tanque Agua Caliente (°C)	Temperatura de Salida Agua Caliente (°C)	t PWM (ms)
	471	40	21,8	800
	472	40	21,8	800
	473	40	21,8	800
	474	40	21,8	800
	475	40	21,8	800
	476	40	21,8	800
	477	40	21,8	800
	478	40	21,8	800
	479	40	21,9	800
	480	40	21,9	800
	481	40	21,9	800
	482	40	21,9	800
	483	40	21,9	800
	484	40	21,9	800
	485	40	21,9	800
	486	40	22,0	800
	487	40	22,0	800
	488	40	22,0	800
	489	40	22,0	800
	490	40	22,0	800
	491	40	22,0	800
	492	40	22,0	800
	493	40	22,0	800

Presentación propia del autor.

2. En el cuadro de comandos se inserta la función indet para que arroje las herramientas “System identification”, es este se agrega “Time –Domain” y asignamos los valores de entrada de las variables escalón y temperatura, así mismo se especifica los intervalos de tiempo en que se tomaron los datos en este caso 1 segundo como se muestra en la imagen 28.

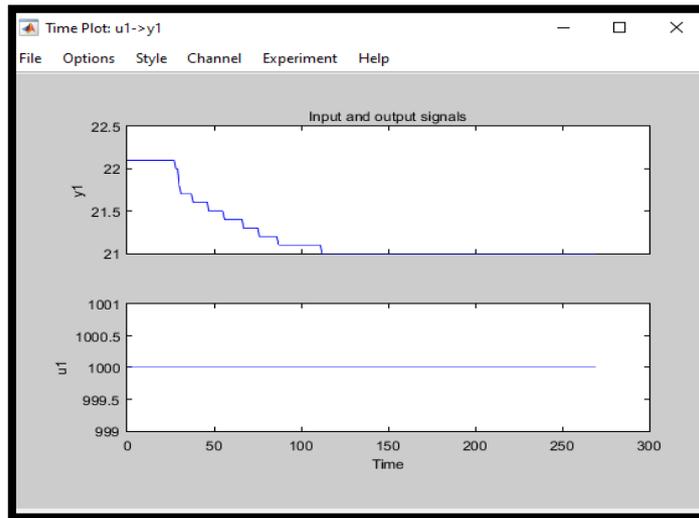
Imagen 28.Import Data



Presentación propia del autor.

3. Ya importados los datos activamos la casilla “TIME PLOT” para verificar que la gráfica que se obtuvo de Excel Grafica 2 y está de Matlab correspondan como se observa en la imagen 29.

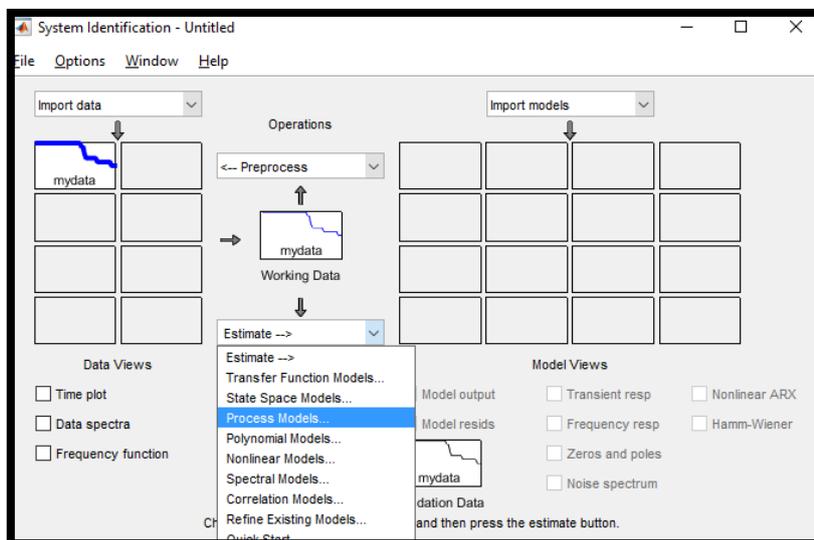
Imagen 29. Output Signals.



Presentación propia del autor.

4. Regresando al menú principal se debe desplegar y se selecciona "Process Models" imagen 30. Donde se observa la estructura de la función de transferencia que se calcula y se oprime el botón "Estimate".

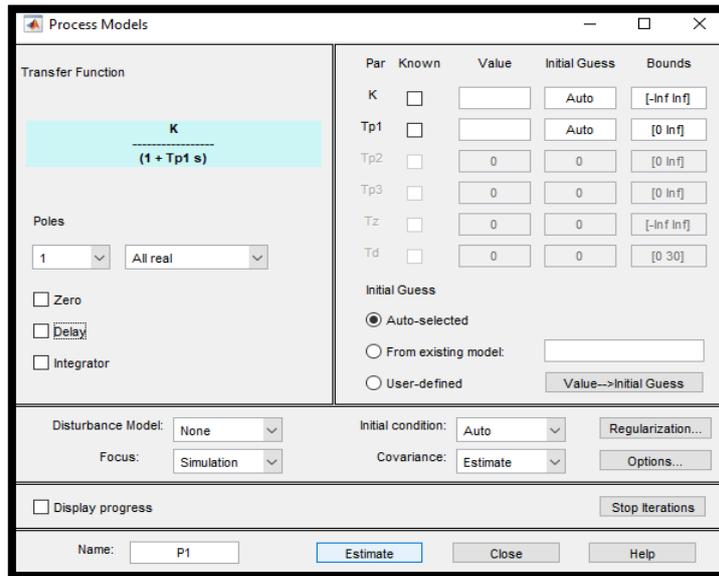
Imagen 30. Process Models.



Presentación propia del autor.

Conforme se oprima la opción Process Models en la ventana de herramientas se muestra la función de transferencia como se observa en la imagen 31.

Imagen 31. Estimar Modelo de Función de Transferencia.

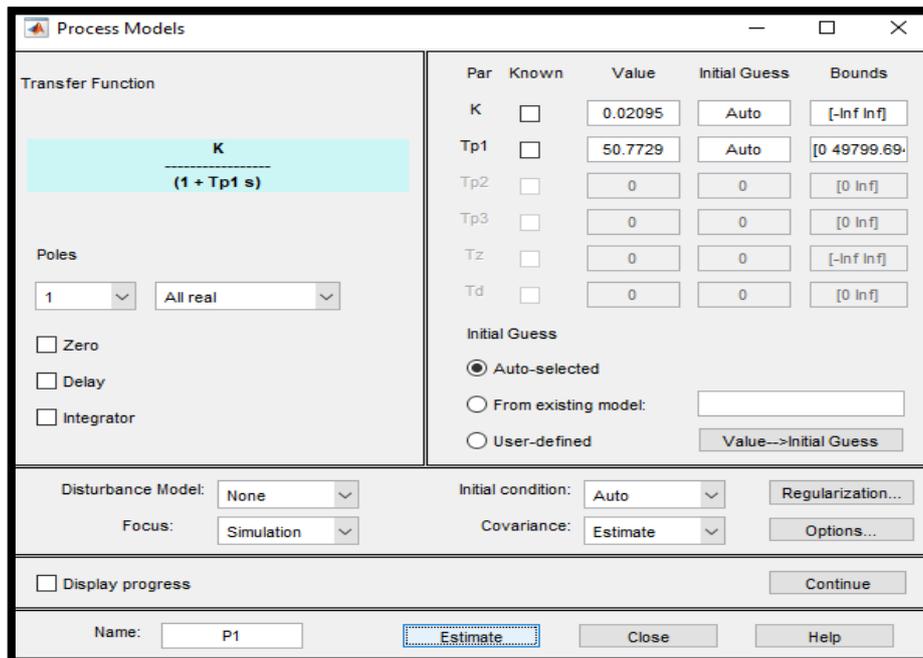


Presentación propia del autor.

- Este determinara unos valores automáticamente según los datos de temperatura importados, seleccionando la opción “Auto-selected” y oprimiendo el botón “Estimate” como se muestra en la imagen 32.

Se obtienen los valores de K (0.02095) constante de ganancia U(s) y Tp1 (50.7729) (S) propios de la función de transferencia.

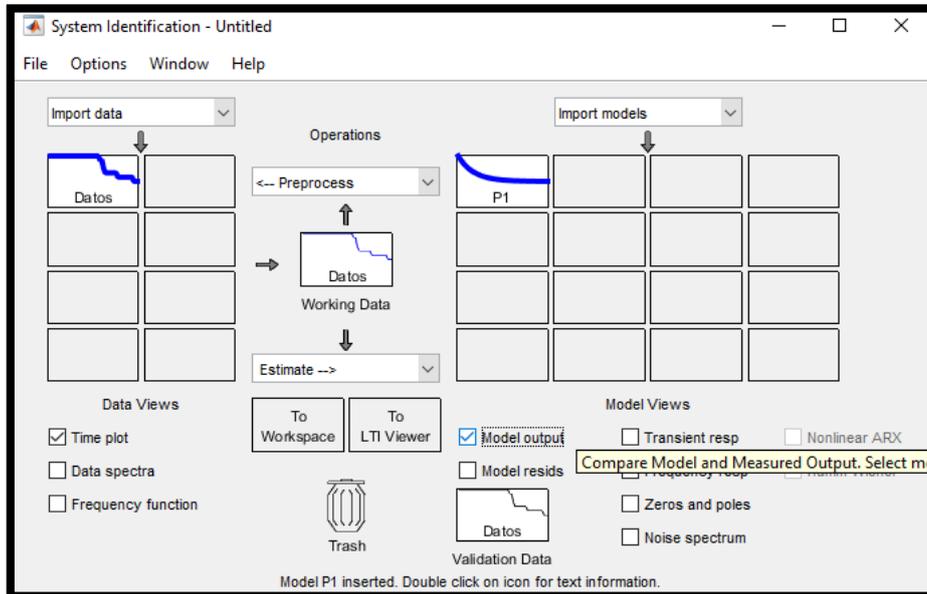
Imagen 32. Valores de función de transferencia según datos importados.



Presentación propia del autor.

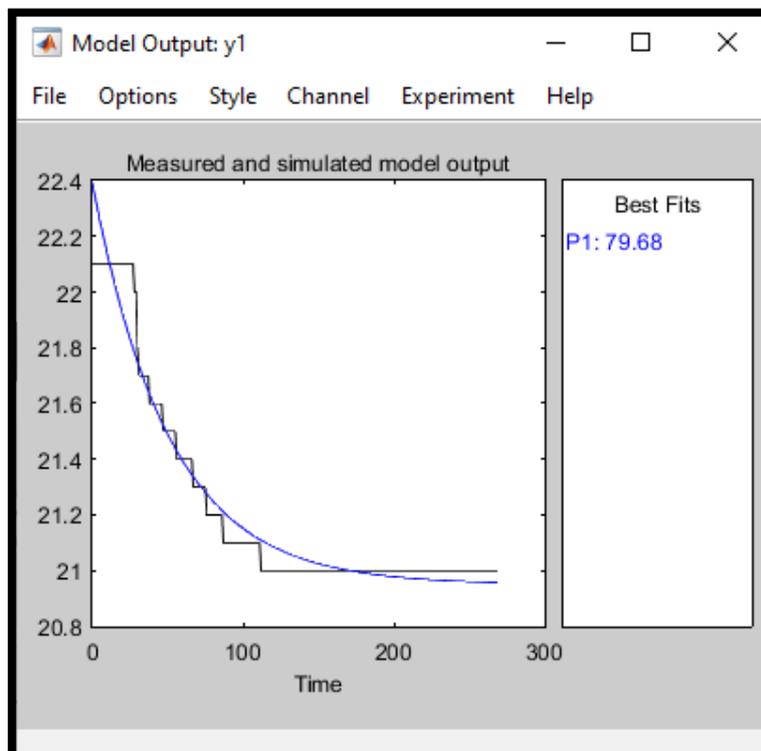
6. Para observar el modelo gráfico estimado según la curva de datos se selecciona la casilla “Model Output” imagen 33 obteniendo como resultado una gráfica con una coincidencia de más del 75%. imagen 34.

Imagen 33. Casilla Model Output



Presentación propia del autor.

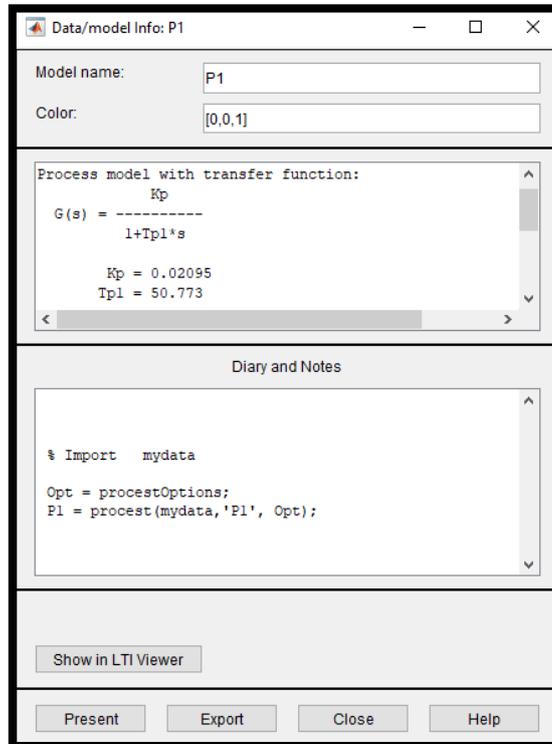
Imagen 34. Model Output 79.68% de exactitud.



Presentación propia del autor.

7. En las propiedades de la función de salida calculada P1 se observan los parámetros calculados de la función de transferencia imagen 35.

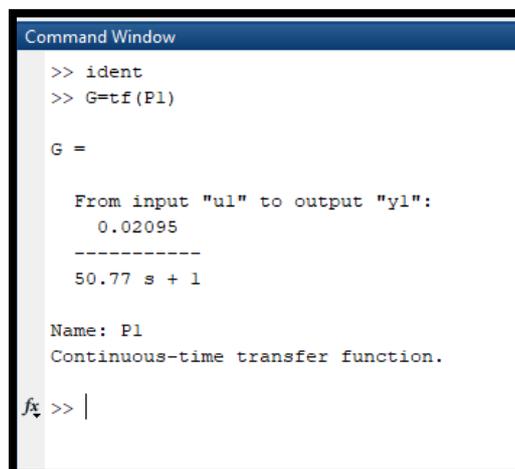
Imagen 35. Data/P1.



Presentación propia del autor.

Regresando a la venta de comandos se obtiene la función de transferencia escribiendo el comando $G=tf(P1)$, se observa la función de transferencia con los valores obtenidos reemplazados como se aprecia en la imagen 36.

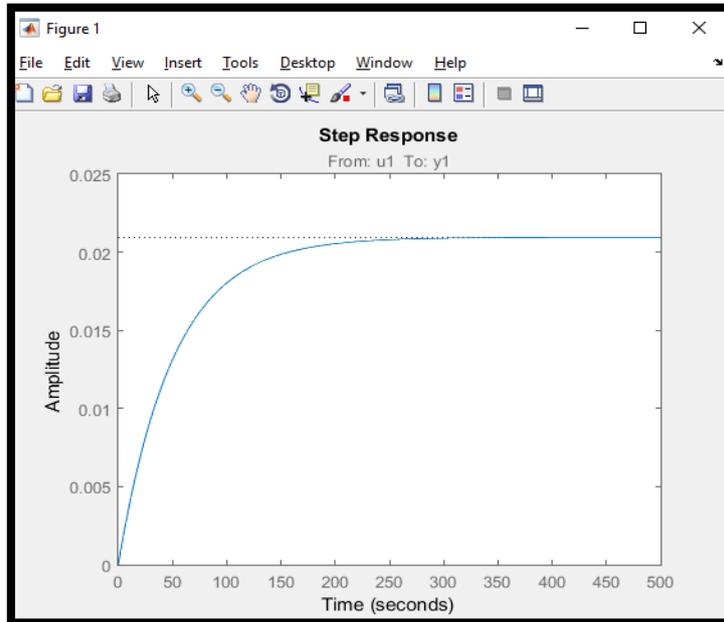
Imagen 36. Obtención de la función de transferencia.



Presentación propia del autor.

8. Ahora escribiendo la función "Step" obtenemos la gráfica de la función de transferencia donde observa el punto donde se estabiliza K imagen 37.

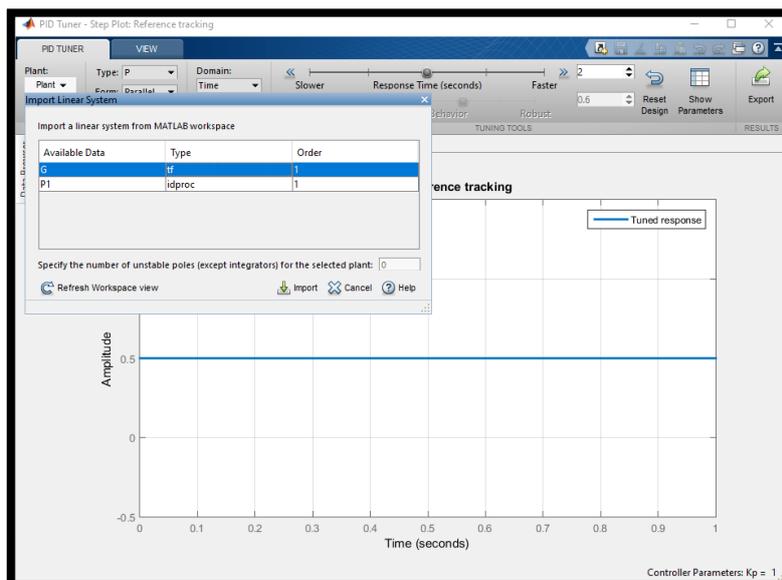
Imagen 37. Obtención de la gráfica función de transferencia.



Presentación propia del autor.

9. En la ventana de comandos con la función PIDTOOLS se importa la función de transferencia G imagen 38.

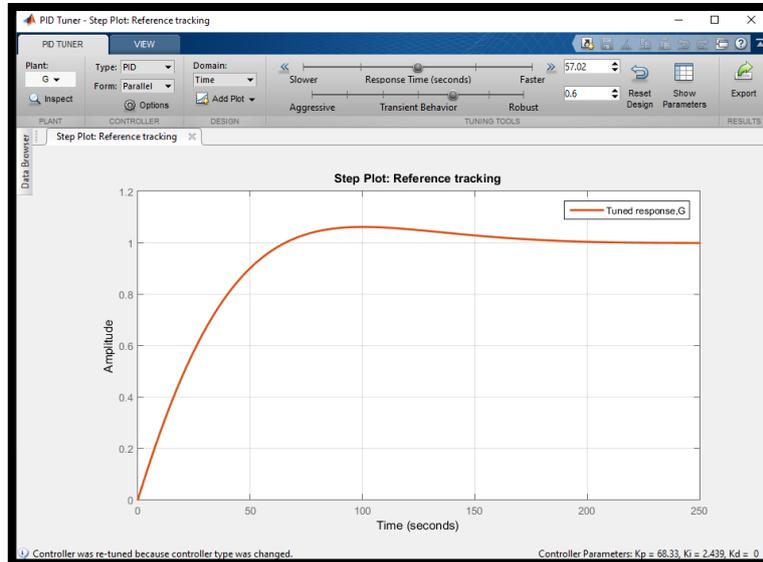
Imagen 38. PID TOOLS.



Presentación propia del autor.

10. Se selecciona el tipo de análisis PID y este arroja una gráfica como se observa en la imagen 39, cuando se le aplica una entrada escalón unitario.

Imagen 39. Grafica PID TOOLS.



Presentación propia del autor.

11. Finalmente se oprima la opción Show Parameters del cual emerge una pantalla con los valores de $K_P=68.33$, $K_I=2.43$ y $K_D=0$ como lo indica la imagen 40.

Imagen 40. Parámetros PID calculados.

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	68.3314
Ki	2.4394
Kd	0
Tf	

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	46.3 seconds
Settling time	161 seconds
Overshoot	6.08 %
Peak	1.06
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	73.8 deg @ 0.0351 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Presentación propia del autor.

5 PROGRAMACIÓN DE PID PLC DELTA

Ya programado todo el protocolo de comunicación se procede a realizar el programa lógico de control por medio del software WPL-SOFT:

5.1. Asignar entradas y salidas.

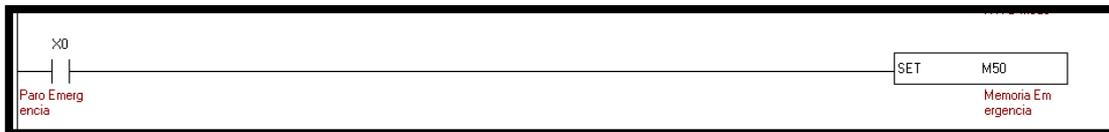
Según plano eléctrico en el ANEXO F2. PLANO CONTROL las entradas físicas son las siguientes:

- X0: Paro Emergencia.
- X1: Pulsador Inicio Ciclo.
- Y0: Bomba Caliente.
- Y1: Bomba fría.

5.2. Programación PLC modo manual

Cuando la entrada X0 se encuentre activa la memoria M50 de seguridad enciende imagen 41.

Imagen 41. Línea de programación 1.

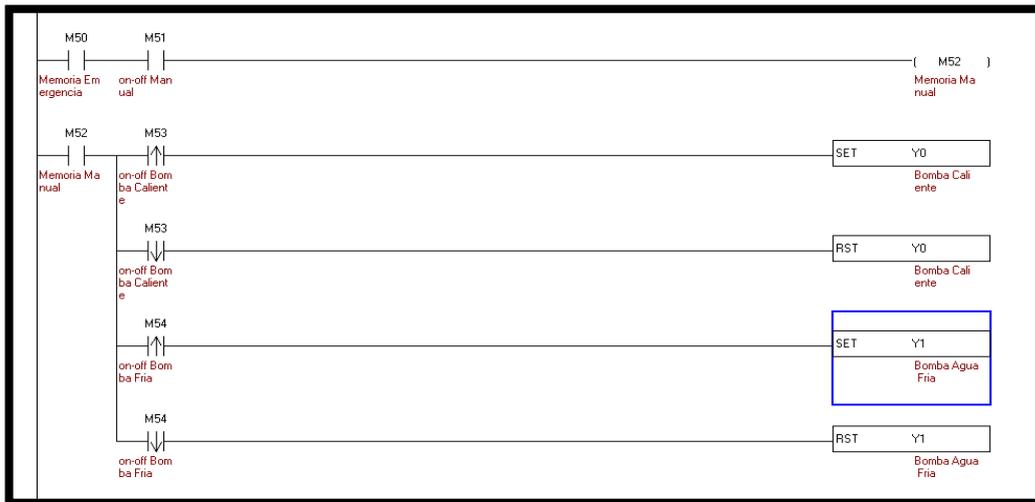


Presentación propia del autor.

La memoria M51 activa el modo manual y paralelo a esta condición los flancos M53 de subida y bajada del botón on-off de la bomba caliente activan y desactivan respectivamente la salida Y0 correspondiente de la bomba de agua caliente.

Así mismo los flancos de subida y bajada de la M54 activan y desactivan en modo manual la bomba de agua fría como se muestra en la imagen 42.

Imagen 42. Línea de programación 2

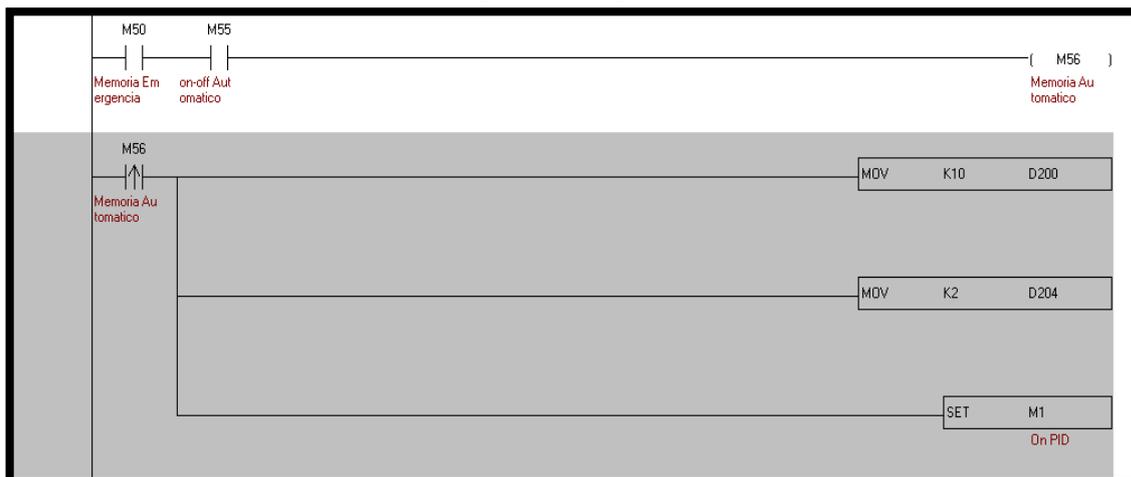


Presentación propia del autor.

5.3. Programación PLC modo Automático PID

La memoria M50 (Memoria emergencia) en serie con un contacto abierto de M55 (On-Off automático) enciende la memoria M56 (Memoria Automático) y a su vez al ser activado activa un flanco ascendente de la memoria, moviendo K10 al registro D200 correspondiente al valor de muestreo del PID (T:10ms), K2 al registro D204 (s3+4 Modo automático 2 PID inverso para procesos de enfriamiento) y en paralelo un SET M1 para activar el proceso PID imagen 43.

Imagen 43. Registros PID.



Presentación propia del autor.

Con la memoria M1 encendida se da paso a la activación del PID el cual se programa de la siguiente manera S1 (Set Value), S2 (Present Value), S3 (Parametro PID) y D (Output Value) como se muestra en el manual de programación del PLC del ANEXO D1. MANUAL DE PLC DVP e imagen 44.

Imagen 44 PID PLC.

API	Mnemonic	Operands	Function	Controllers													
88	D PID	S ₁ S ₂ S ₃ D	PID control	ES2/EX2 SS2 SA2 SE SX2													
Type	Bit Devices		Word devices											Program Steps			
OP	X	Y	M	S	K	H	KnX	KnY	KnM	KnS	T	C	D	E	F	PID : 9 steps DPID: 17 steps	
S ₁														*			
S ₂														*			
S ₃														*			
D														*			
		PULSE			16-bit				32-bit								
		ES2/EX2	SS2	SA2 SE	SX2	ES2/EX2	SS2	SA2 SE	SX2	ES2/EX2	SS2	SA2 SE	SX2				

Operands:
 S₁: Set value (SV) S₂: Present value (PV) S₃: Parameter setting (for 16-bit instruction, uses 20 consecutive devices, for 32-bit instruction, uses 21 consecutive devices) D: Output value (MV)

Presentación propia del autor.

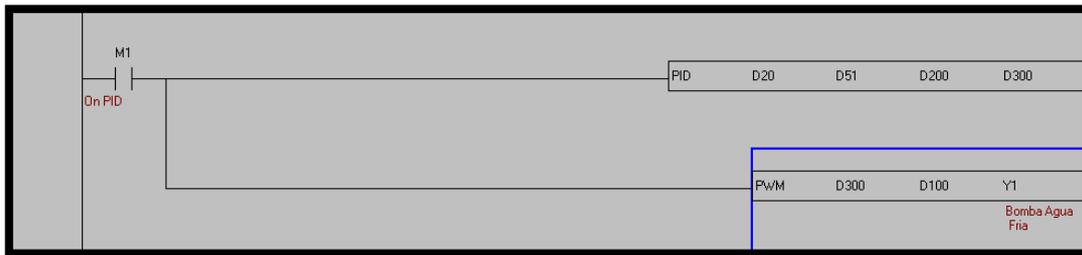
La programación del PID imagen 45 queda de la siguiente manera:

- D20: Valor establecido (VS).
- D51: Valor presente (SENSOR SALIDA AGUA CALIENTE).
- D200: Valor de muestreo (T:10ms).
- D300: Valor de salida.

La salida de PWM queda de la siguiente manera:

- D300: Valor de salida (t PWM).
- D100: Valor (T PWM).
- Y1: Bomba agua fría.

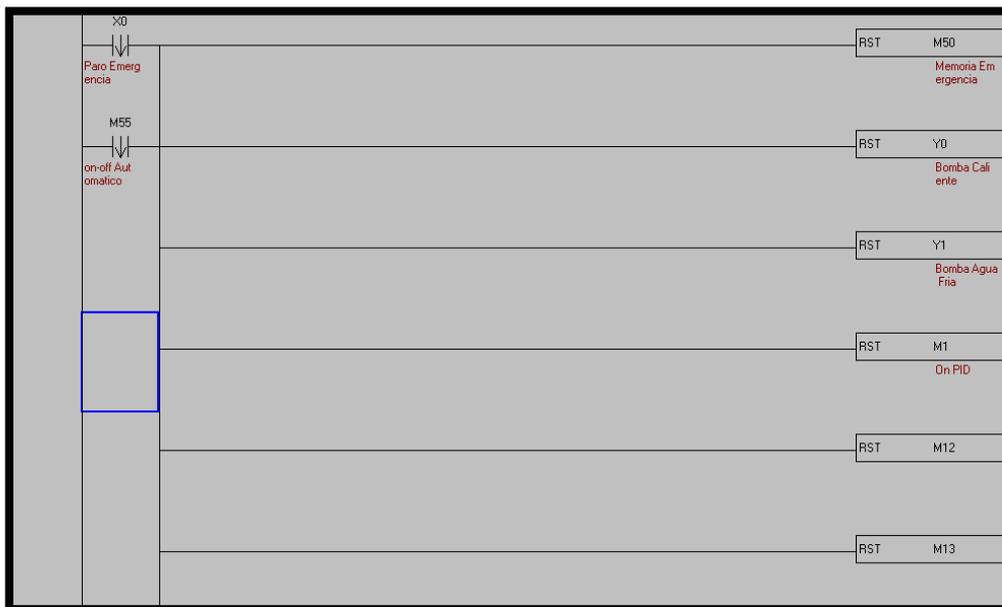
Imagen 45. PID y PWM Programado.



Presentación propia del autor.

Se puede observar en la imagen 46 un flanco X0 (Emergencia) resetea M50 (Memoria Emergencia), M1 (Memoria On PID), M12 y M13 (Memorias de ON-OFF tiempo bomba Y0), Y1 (Bomba Agua Fría) y Y0 (Bomba Agua Caliente).

Imagen 46. Línea de programación 3.



Presentación propia del autor.

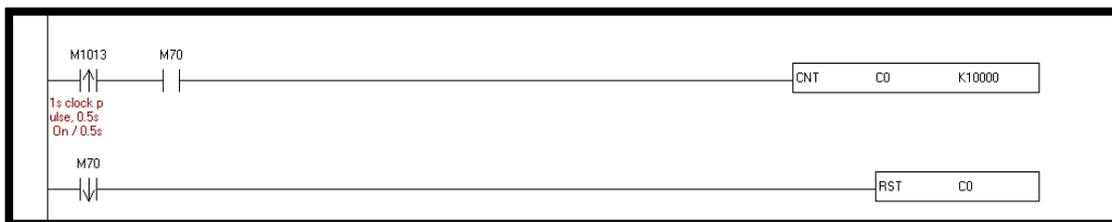
5.4. Obtención de valores teóricos PID

Procedimiento de implementación de control PID

El tiempo de muestreo es uno de los parámetros básicos dado que estamos implementando el proyecto con elementos de entradas y salidas digitales; siendo este necesario para la toma de muestras en determinados instantes de tiempo conforme se va ejecutando cada línea de instrucción.

Para lograr implementar este tiempo y no depender del procesamiento propio del dispositivo en este caso de la pantalla HMI, se crea un contador (C0) en el PLC con un flanco de subida M1003 () el cual ira incrementando cada segundo como se muestra en la imagen 47.

Imagen 47. Creación de contador



Presentación propia del autor.

Ahora bien, para que la pantalla HMI lea este valor se programa en una macro de tipo Clock en la cual se declara una variable interna (\$12) y asignarlo al valor del contador ({Link1}1@PLC_C0). Así mismo se declaran dos variables más llamadas T (Tiempo de inicial (\$10) = 1) y otra llamada pasado (\$11) = 0, ya con estas dos variables, se realiza una resta para determinar el cambio del tiempo conforme se va ejecutando las instrucciones de muestreo. Como se indica en la imagen...

Imagen 48. Determinación del cambio en el tiempo.

```
#AHORA TOMA DE MUESTRAS
$12 = {Link1}1@PLC_C0
#CAMBIO = AHORA - PASADO
$13 = $12 - $11
```

Presentación propia del autor.

Ya hecho lo anterior declaramos un condicional IF para iniciar la toma de valores siempre y cuando se cumpla el umbral del tiempo, finalmente se actualiza la variable pasado con el valor del contador en el momento en que se toma la muestra con la siguiente instrucción (\$11 = \$12).

5.5. Implementación de control proporcional.

Se define una variable error (\$1) para hallar el cambio del valor de referencia con respecto al valor de lectura del sensor los cuales se asignan como muestra en la imagen 49.

Imagen 49. Variable de error.

```
#VALOR SET POINT DE TEMPERATURA DESEADA SP
$20 = {Link1}1@PLC_D20
#VALOR DE GRAFICA
$21 = {Link1}1@PLC_D51
#VALOR DEL SENSOR DE SALIDA DE TEMPERATURA VP
$22 = {Link1}2@TEMP_CTRL-1000
```

Presentación propia del autor.

Y la señal de control simplemente es multiplicar una ganancia KP por el error, la cual será asignada al valor ({Link1}1@PLC_D300).

5.6. Implementación de control integral.

Para implementar el control integral se añaden otra variable llamada error pasado (la cual nos ayuda a determinar el área aproximada en cada toma de tiempo) realizando el siguiente calculo ($\$2 = \$1 * \$10 + \2) la cual indica que el error en un instante de tiempo por el tiempo de muestreo más el error pasado que va sumando las diferentes áreas que van pasando esto se puede observar en la imagen 50.

Imagen 50. Error pasado.

```
#CONTROL INTEGRAL (I = KI * ERRORPASS)
{Link1}1@PLC D301 = ({Link1}1@PLC D502 * $2)
```

Presentación propia del autor.

Con lo anterior multiplicaríamos ese valor obtenido por el asignado al parámetro KP y este se guarda a una variable (`{Link1}1@PLC_D301`) y así se obtendría la señal de control correspondiente.

5.7. Implementación de control derivativo.

Con este control hallaríamos la aproximación de la derivada entre una toma de muestra y otra esto quiere decir que se estaría hallando la pendiente, es así que se declara una nueva variable llamada error ($\$3$) anterior el cual va a traer el valor del error en una toma anterior y esto se hace al final del código en cada instante de tiempo con la siguiente instrucción ($\$3 = \1) ya con este se realiza el cálculo del valor derivativo como se muestra en la imagen 51.

Imagen 51. Cálculo de valor derivativo.

```
#CONTROL DERIVATIVO (D = KD * ERRORD)
{Link1}1@PLC_D302 = {Link1}1@PLC_D503 * $4
```

Presentación propia del autor.

Ahora con ese resultado obtenido se obtendría la señal de control correspondiente multiplicándola con el valor KD asignado guardando este dato en el registro ($\$4 = (\$1 - \$3) / \10).

5.8. Implementación PID

Ya obtenidos los valores de P, I y D realizamos la suma de estos para obtener la señal de control final la cual va enlazada al registro (`{Link1}1@PLC_D500`) el cual es tomado para realizar el PWM en el PLC como observamos en el anexo

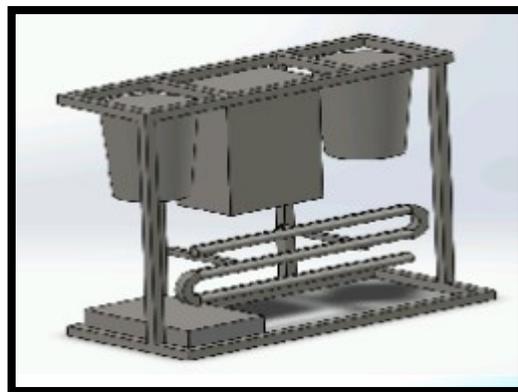
6 DESARROLLO DE INTERFAZ GRÁFICA HMI

El desarrollo de la interfaz busca seccionar de manera puntual los distintos segmentos comprendidos de control de temperatura, control a lazo abierto y cerrado, a continuación, se describe el procedimiento de diseño y programación:

6.1. Pantalla de inicio

En esta pantalla la cual será la principal se muestra de manera esquemática una imagen del diseño en 3D del banco ensamblado en su totalidad imagen 47.

Imagen 52. Modelo 3D del intercambiador.

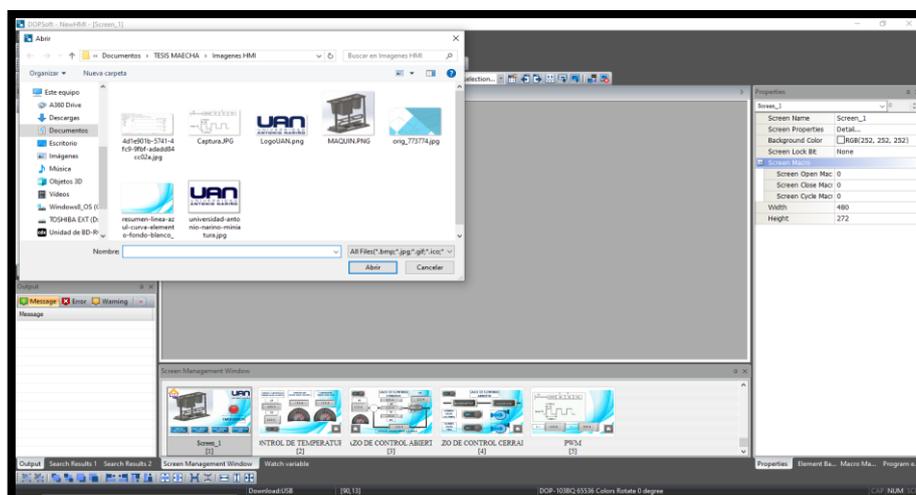


Presentación propia del autor.

6.2. Fondo

Se selecciona la imagen (resumen-linea-azul-curva-elemento-fondo-blanco_40760-68.jpg) accediendo a la barra de herramientas en la opción Screens/import. Imagen 48.

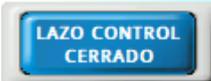
Imagen 53. Imagen de fondo.



Presentación propia del autor.

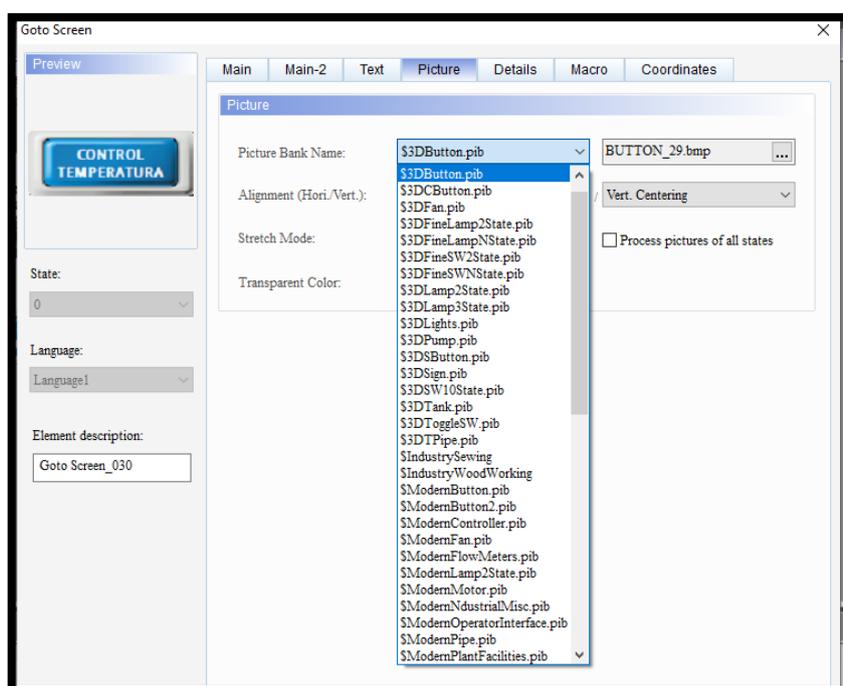
6.3. Botones

Se crean 4 botones tipo Goto Screen en la barra de herramienta opción Button como se indica:

-  este botón direcciona a la pantalla de control de temperatura.
-  este botón direcciona a la pantalla de lazo de control cerrado.
-  este botón direcciona a la pantalla de lazo de control abierto.
-  este botón direcciona a la pantalla de la configuración PWM.

En las propiedades del botón en la pestaña PICTURE se escoge el diseño 3DButton como indica la imagen 49.

Imagen 54. Propiedades Button.

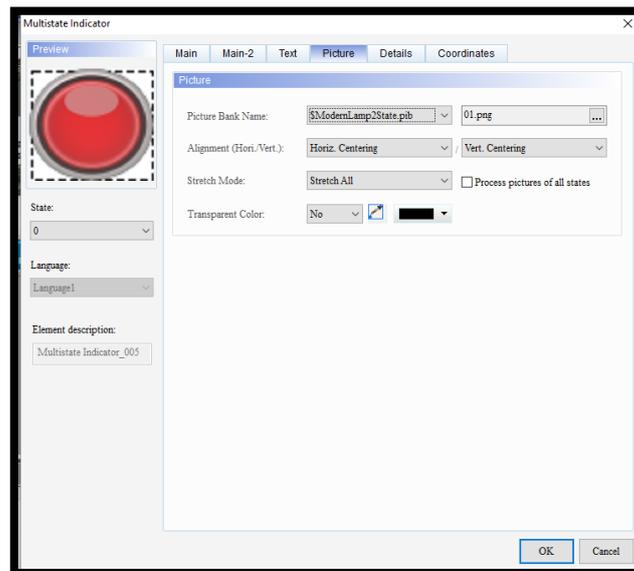


Presentación propia de los autores.

6.4. Indicador

Se arrastra un indicador de la barra de herramientas y se selecciona el tipo de diseño "\$ModenLamp2state" imagen 50.

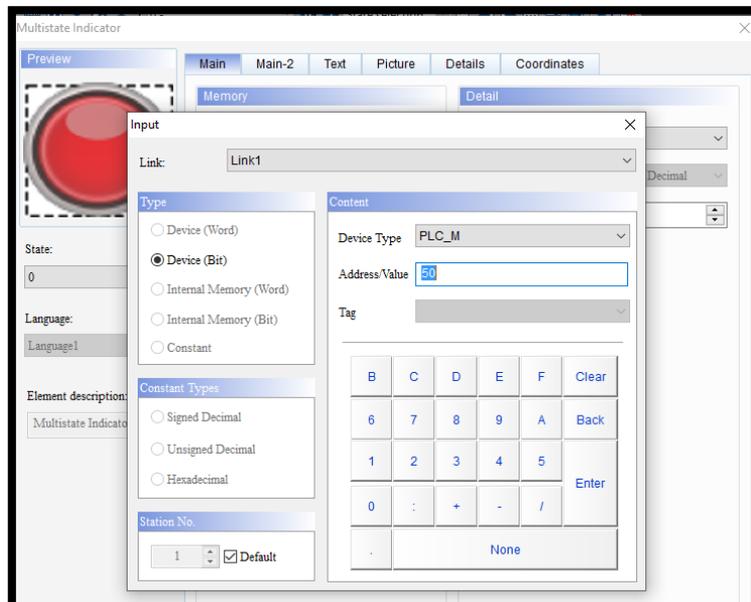
Imagen 55. Indicador Emergencia.



Presentación propia del autor.

Seguido a esto se asigna la dirección de lectura del protocolo como indica la imagen 51 correspondiente al {Link1}1@PLC_M50.

Imagen 56. Dirección Indicador Emergencia.



Presentación propia del autor.

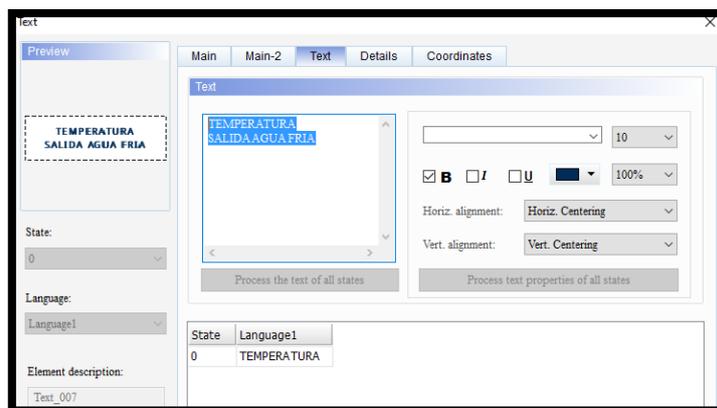
6.5. Pantalla Control de Temperatura

6.5.1. Text label

Se añaden 3 text label en la pestaña text como indica la imagen 52, haciendo referencia los siguientes:

- CONTROL TEMPERATURA TANQUE AGUA CALIENTE.
- TEMPERATURA SALIDA AGUA CALIENTE.
- TEMPERATURA SALIDA AGUA FRIA.

Imagen 57. Dirección Indicador Emergencia 2.



Presentación propia del autor.

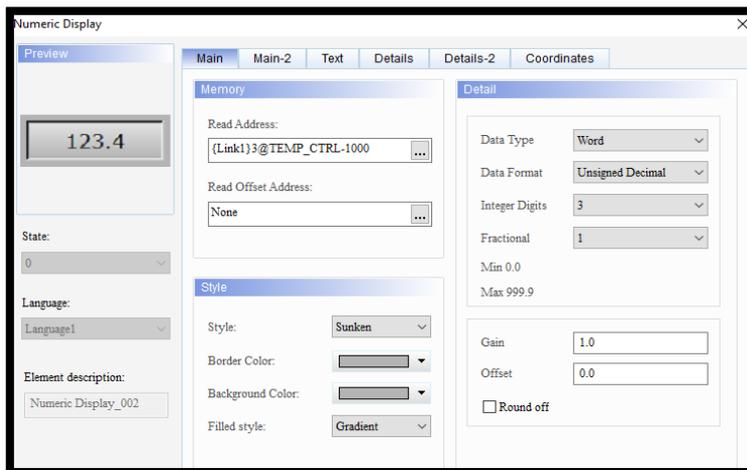
6.5.2. Numeric Display

Para la lectura de temperatura se agregan 3 numeric display correspondientes a los tres controles como indica la imagen 53:

- {Link1}3@TEMP_CTRL-1000
- {Link1}2@TEMP_CTRL-1000
- {Link1}4@TEMP_CTRL-1000

La dirección (1000H) corresponde a “Present Temperatura Value (PV)” los cuales están determinados en el manual de operación de los controles de temperatura.

Imagen 58. Dirección PV Control de temperatura 1.

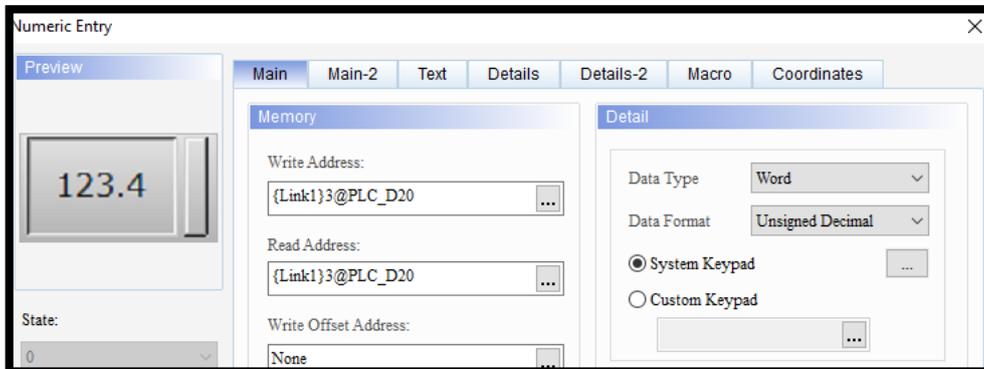


Presentación propia del autor.

6.5.3. Numeric Entry

Para designar el valor de temperatura a la cual debe llegar el agua caliente se agrega un Numeric Entry y se asigna la dirección “(1001H) Set point (SV)” como se indica en la imagen 54.

Imagen 59. Dirección PV Control de temperatura 2.

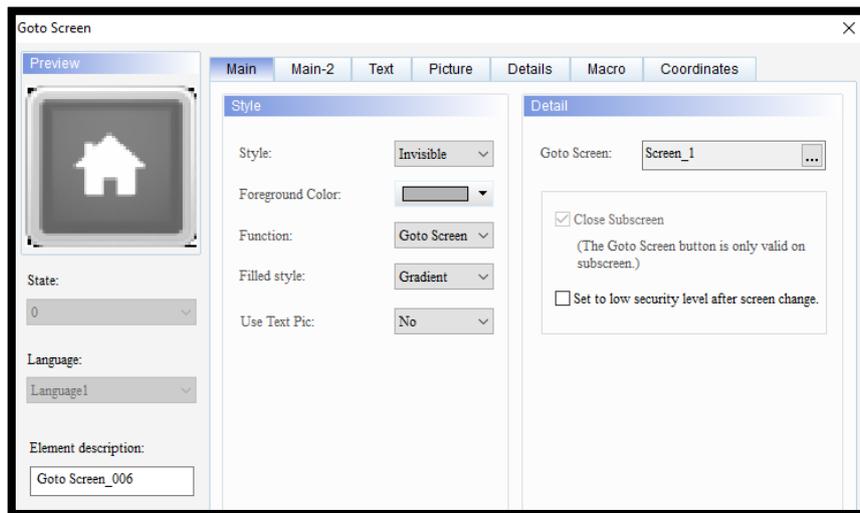


Presentación propia del autor.

6.5.4. Goto Pantalla principal

Para regresar a la pantalla principal se crea un botón Goto Screen indicando la pantalla principal como se indica en la imagen 55.

Imagen 60. Dirección PV Control de temperatura 3.

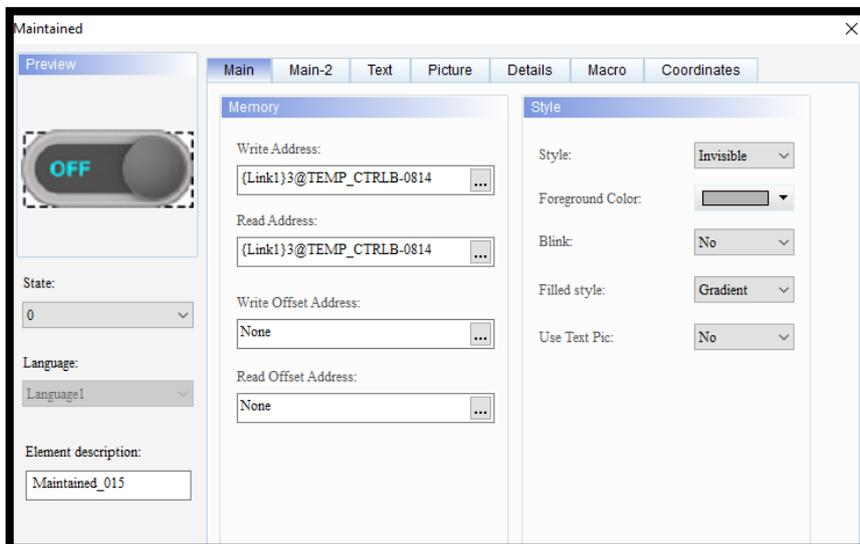


Presentación propia del autor.

6.5.5. Button On

Se asigna un botón tipo “Maintained” para el accionamiento manual del control de temperatura del tanque de agua caliente, con la dirección “(0814) Run/Stop setting” como indica en la imagen 56.

Imagen 61. On off Manual control de temperatura.

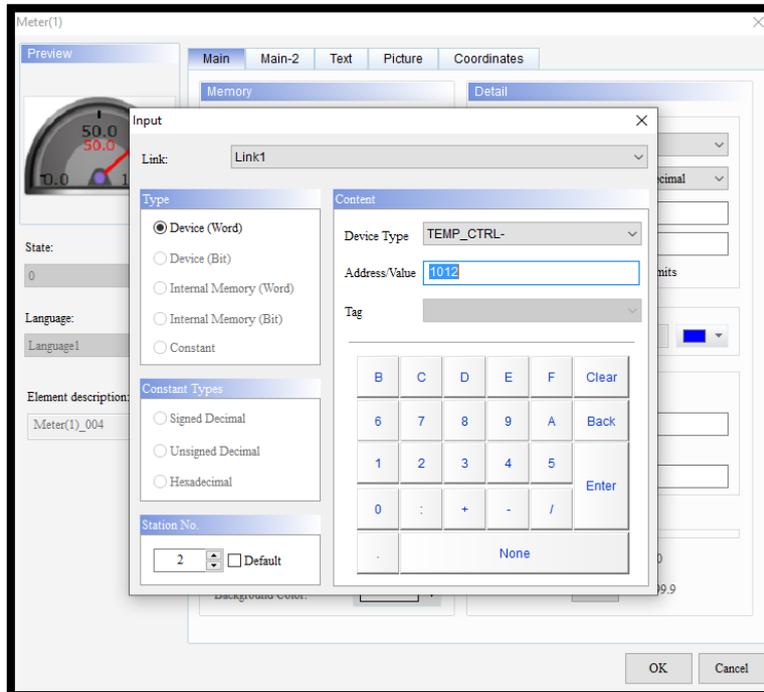


Presentación propia del autor.

6.5.6. Metter visualización

En la imagen 57 se puede visualizar la temperatura de modo grafico se agrega un botón Meter y se asigna la dirección “(1012H) Read/Write output percentage of output 1.

Imagen 62. Visualizador Meter de temperatura



Presentación propia del autor.

6.5.7. Pantalla Control lazo cerrado

Para representar de manera gráfica un control de lazo cerrado se agregan los siguientes controles con las direcciones correspondientes:

- VS (Set value) {Link1}1@PLC_D20 : ingresar valor de temperatura a la cual se quiere llegar.
- KP (Ganancia proporcional) {Link1}1@PLC_D501: ingresar valor de la ganancia proporcional (Rango 0-30%)
- KI (Ganancia Integral) {Link1}1@PLC_D502: ingresar valor de la ganancia integral (Rango 0-30%)
- KD (Ganancia Derivativa) {Link1}1@PLC_D503: ingresar valor de la ganancia derivativa (Rango 0-30%)
- VP (Present Value) {Link1}3@TEMP_CTRL-1000: temperatura de salida del agua caliente.
- Sensor {Link1}2@TEMP_CTRL-1000: temperatura de salida del agua caliente.

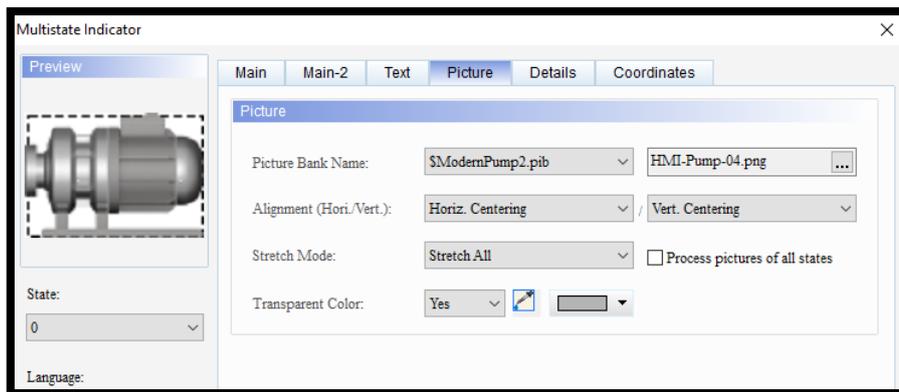
Para esquematizar el lazo de control se utilizan siguientes herramientas para realizar figuras como se indican en las imágenes 58 y 59:

Imagen 63. Herramientas de dibujo



Presentación propia del autor.

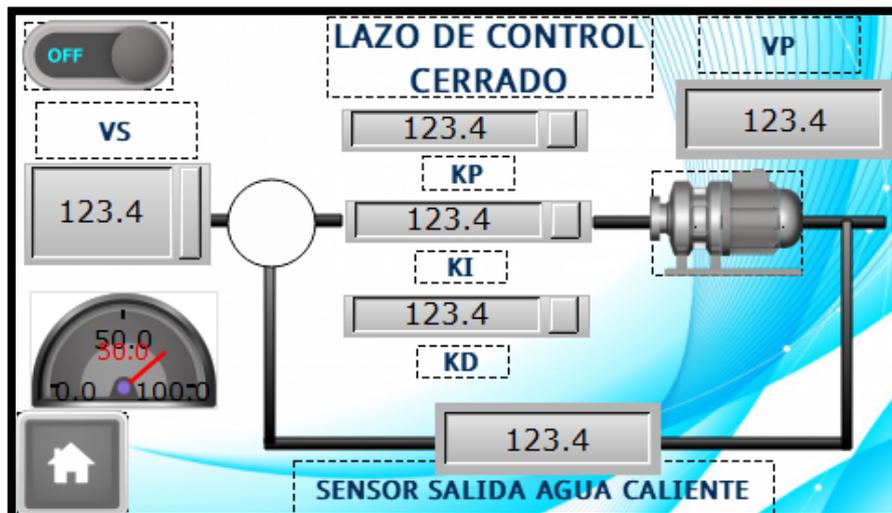
Imagen 64. ModernPump2.



Presentación propia del autor.

Finalmente, basado en el esquema de un control de lazo cerrado se grafica la pantalla como se indica en la imagen 60.

Imagen 65. Esquema Lazo de control cerrado.



Presentación propia del autor.

6.5.8. Pantalla Lazo de Control Abierto

Para representar de manera gráfica un control de lazo abierto se agregan los siguientes controles con las direcciones correspondientes:

- ON/OFF Bomba Agua Caliente {Link1}1@PLC_M53: Botón ON/OFF para energizar bomba que recircula agua caliente.
- ON/OFF Bomba Agua fría {Link1}1@PLC_M54: Botón ON/OFF para energizar bomba de agua fría.

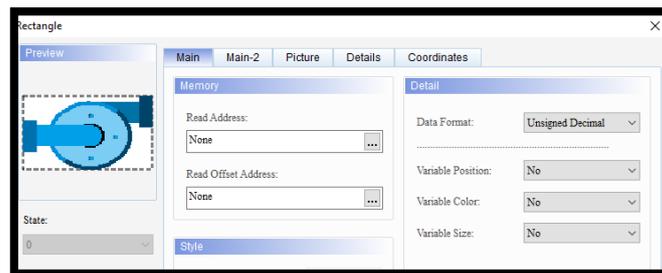
Para esquematizar el lazo de control se utilizan siguientes herramientas imagen 61 y 62 para realizar figuras:

Imagen 66. Herramientas de dibujo.



Presentación propia del autor.

Imagen 67.ModermPump.



Presentación propia del autor.

Finalmente, basado en el esquema de un control de lazo abierto se grafica la pantalla como se indica en la imagen 63.

Imagen 68. Esquema Lazo de control abierto.



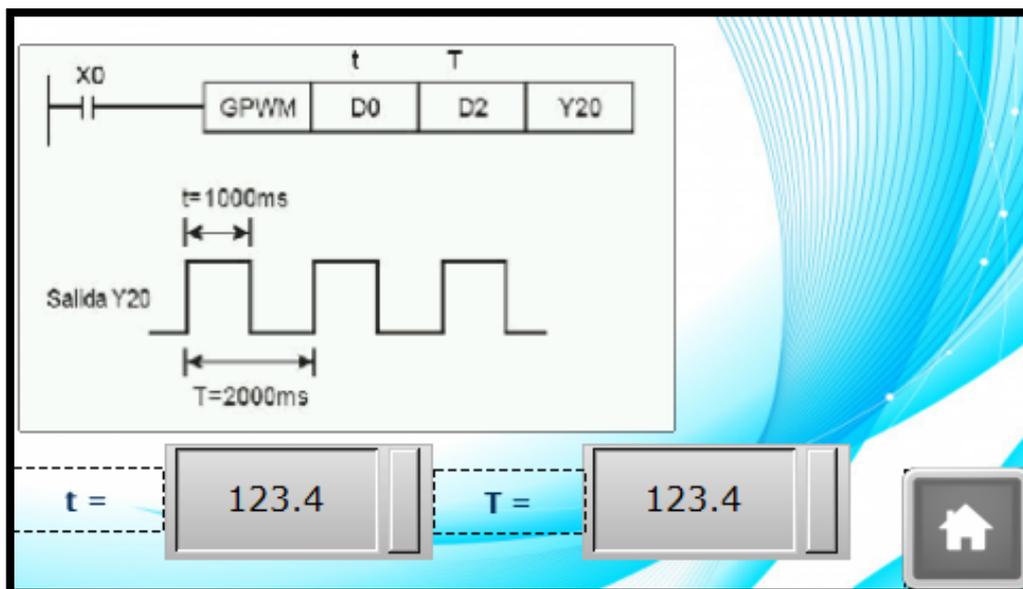
Presentación propia del autor.

6.5.9. Pantalla PWM

Se puede observar en la imagen 64 la pantalla PWM la cual fue insertada y hace parte del manual del PLC de la función PWM donde se especifica lo siguiente:

- t = Amplitud en ms - {Link1}1@PLC_D1117
- T = Periodo en ms - {Link1}1@PLC_D100

Imagen 69. Pantalla PWM.



Presentación propia del autor.

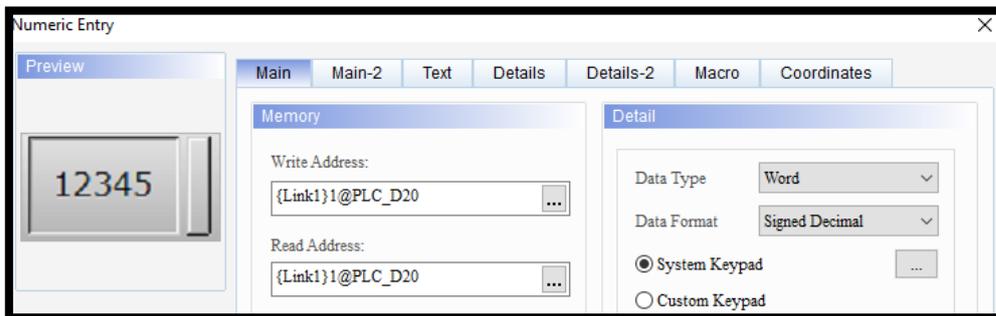
7 CONFIGURACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

7.1. Configuraciones

Antes de realizar pruebas con el dispositivo se realizan los siguientes ajustes:

- Se configura la ganancia del “Numeric Entry” del registro {Link1}1@PLC_D20 de la pantalla de lazo cerrado por un valor de 0.1 como se observa en la imagen 65, ya que en la lectura del PLC estaba multiplicando el valor ingresado siendo este un valor elevado.

Imagen 70. Registro PLC D20.

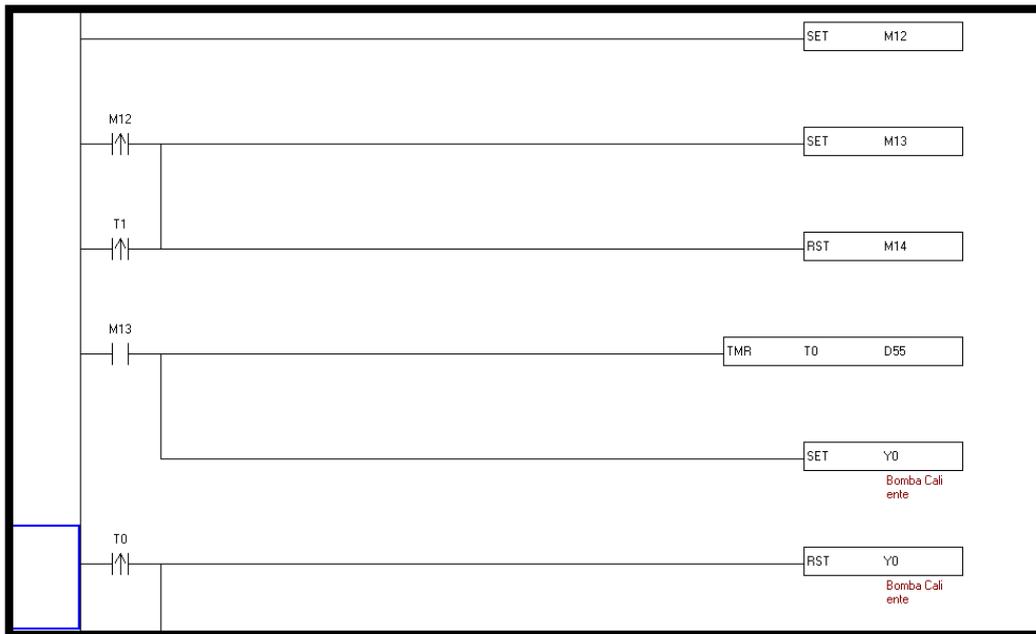


Presentación propia del autor.

- Ya que al momento de realizar pruebas para la programación del PID la bomba que recircula el agua caliente se mantenía encendida, esta llenaba más rápido el tanque, obligando al usuario a llenar el platón continuamente a tal punto de tenerla que apagar la bomba.

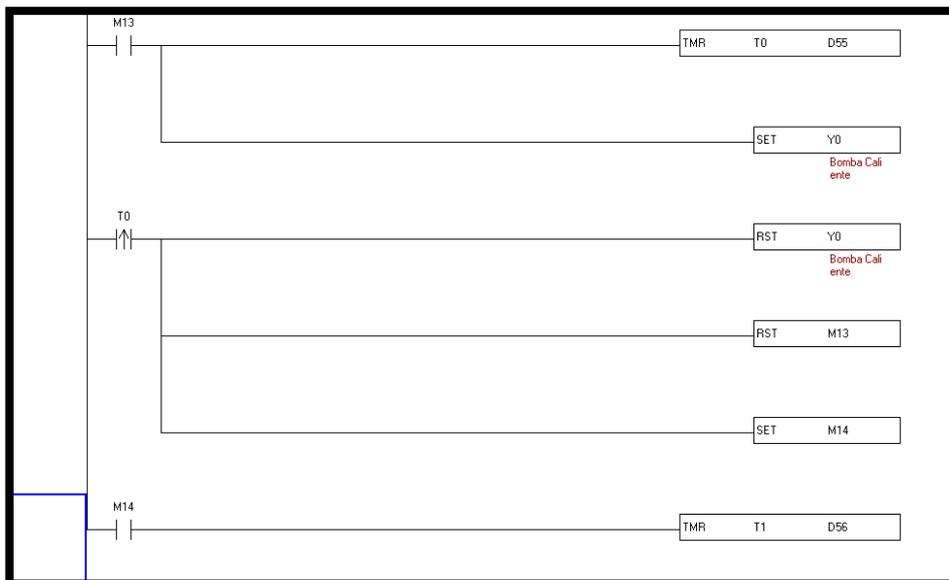
Es así, para evitar este problema se programa en el PLC como se observa en las imágenes 66 y 67, un sistema de encendido de la bomba para que este mantenga prendida la bomba por determinado tiempo con T0 y otra de espera T1 para encenderla nuevamente a fin de que se mantenga un nivel adecuado de agua en el tanque.

Imagen 71. Timer ON Bomba Caliente.



Presentación propia del autor.

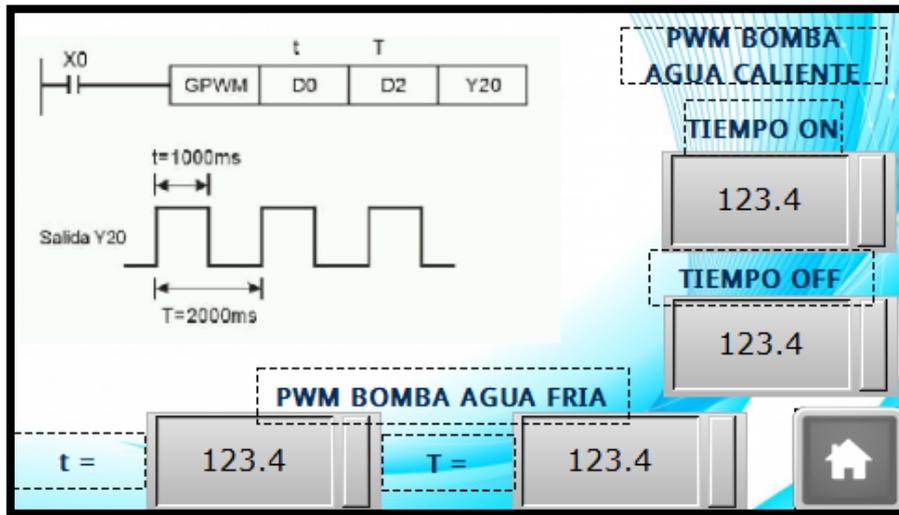
Imagen 72. Timer OFF Bomba Caliente.



Presentación propia del autor.

- Como se evidencia en la imagen 68 para que el sistema de encendido no dependiera netamente de valores fijos por el PLC se agregan dos "Numeric Entry" en la pantalla de configuración del PWM para poder modificar los tiempos de encendido y apagado de la bomba, direccionándolos a los registros D55 y D56 respectivamente.

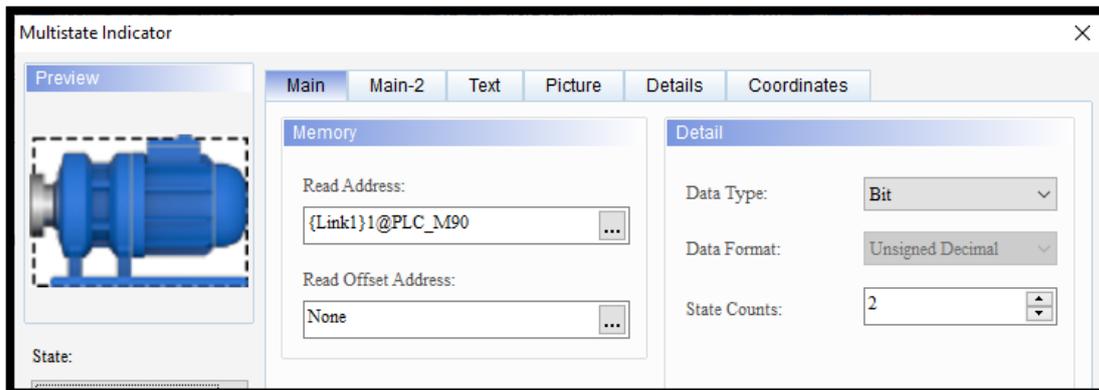
Imagen 73. Configuración de tiempo ON y OFF tiempo encendido bomba.



Presentación propia del autor.

- Para identificar el encendido de la bomba que recircula el agua fría se direcciona a una memoria M90 para que la bomba cambie de color como se muestra en la imagen 84.

Imagen 74. Cambio de estado Bomba Y1.



Presentación propia del autor.

7.2. Puesta en marcha.

7.2.1. Procedimiento para puesta en marcha de control lazo cerrado.

1. Llenar tanques de agua fría y caliente. Imágenes 70,71 y 72.

Imagen 75. Llenado de tanque de agua caliente.



Presentación propia del autor.

Imagen 76. Llenado de tanque de agua fría.



Presentación propia del autor.

Imagen 77. Tanque de recirculación de agua caliente.



Presentación propia del autor.

2. Entrar a la pantalla de control de temperatura y establecer un setpoint de 35 grados para calentar el agua del tanque. Imagen 73.

Imagen 78. Establecer temperatura a 35 grados.

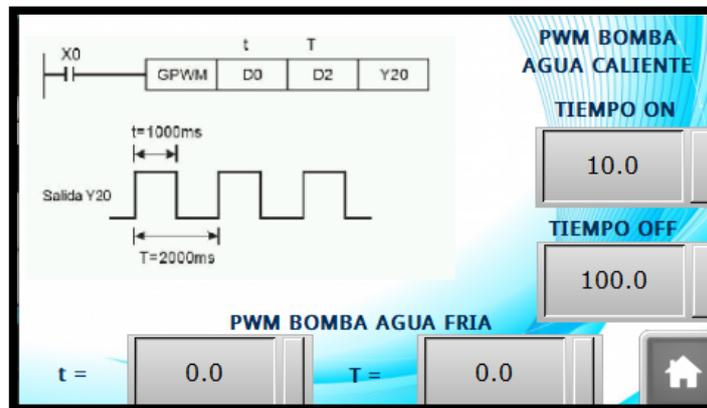


Presentación propia de los autores.

3. Ya con el agua caliente, se abren la válvula de paso del agua y se espera un momento hasta que se establezca un valor fijo de temperatura que estaría leyendo el sensor de salida del agua caliente.

4. Se puede observar en la imagen 74 el ingreso a la pantalla de configuración de PWM y se establece un valor de tiempo ON de 10 y valor de tiempo off de 100 para el encendido de la bomba de agua caliente.

Imagen 79. Establecer Tiempo ON y OFF para bomba de agua caliente.



Presentación propia del autor.

5. Ya configurado todo lo anterior se establece un valor de temperatura a la cual debe llegar el sistema en este caso 28 °C esto se puede observar en la imagen 75. Se oprime el botón de encendido y finalmente se oprime el pulsador negro del tablero para dar inicio al ciclo.

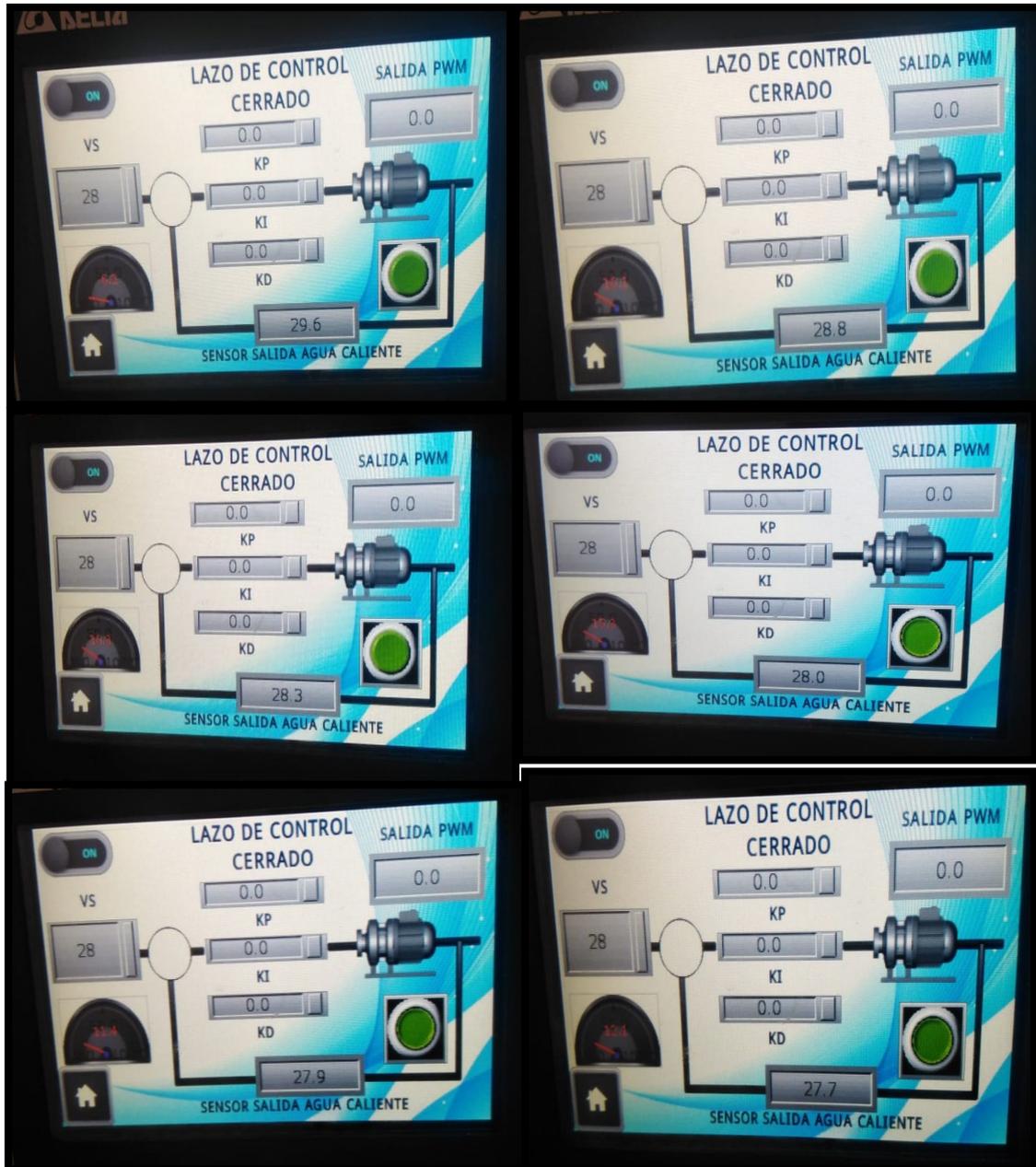
Imagen 80. Establecer valor VS.



Presentación propia del autor.

6. A continuación en la imagen 76. Se aprecia el cambio de temperatura del agua de salida del intercambiador desde 27.7 °C hasta 29.6 °C y un indicador que muestra cuando estuvo encendida y pagada la bomba.

Imagen 81. Valor de temperatura del sensor de salida de agua caliente.



Presentación propia del autor.

8 ANALISIS Y RESULTADOS

Con la integración del intercambiador de calor de la universidad Antonio Nariño y el sistema de control automatizado, se logra el desarrollo práctico del funcionamiento de un sistema de control de modo automático y manual haciendo uso del protocolo de comunicación ModBUS RTU.

A través de la investigación del funcionamiento del intercambiador y haciendo uso de la tesis del diseño del intercambiador, se logra caracterizar tanto el funcionamiento teórico, como los elementos físicos que interviene en la estructura.

Seguido a esto se realiza el diseño de potencia, control y comunicación para la automatización del sistema por medio del software de diseño AutoCAD en base a esto se realiza el montaje y cableado de los elementos eléctricos en el gabinete teniendo en cuenta los parámetros básicos de RETIE.

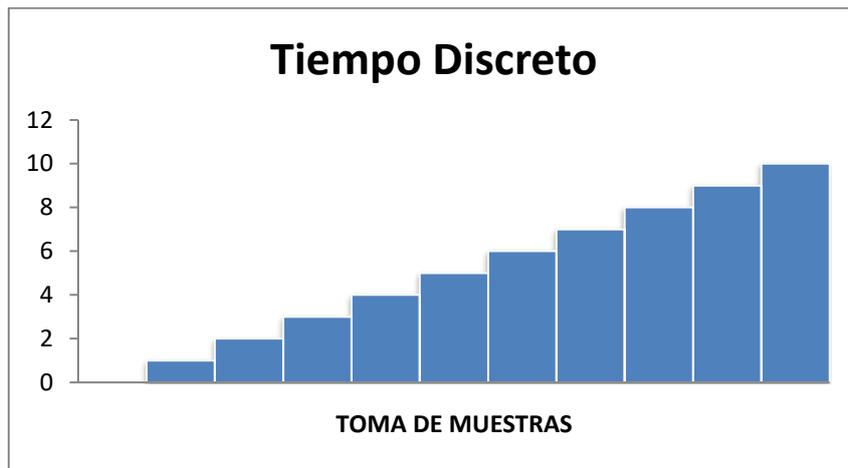
En primera instancia se establece protocolo de comunicación interfaz (RS-485), Data (7 bits), Stop Bits (1 Bits), Baud Rate (9600) b/s y Parity Bits (Even) Delta controler MobBUS RTU para el COM 1 donde se enlazan con el PLC (Dirección 1) moviendo el registro MOV H86 D1120 el cual se establece a partir de la tabla de parámetros de configuración que se encuentra en el manual de operación del PLC anexo o bien la imagen 11 lo cual indica H8(9600) 1000, 1 bit 0, 00 Ninguno y 0 7 Bits , y para los controles de temperatura se estableció el mismo protocolo con ayuda de software DTCOM indicando la dirección 2 Temperatura de salida agua caliente, 3 Temperatura tanque agua caliente y 4 temperatura Salida agua fría.

Establecer estos parámetros adecuadamente son necesarios ya que se nos presentaron dos inconvenientes pero que gracias a la alarma que arroja la pantalla HMI como lo indica la imagen ... se pudieron evidenciar siendo estas ventajas de la marca DELTA.

1. Si no se direcciona adecuadamente los mismos parámetros de comunicación, además de que no se encuentre repetida la dirección de cada elemento según el registro que se deba modificar según dispositivo la pantalla arrojará error de comunicación en el puerto establecido.
2. Si no se poncha, conecta o polariza adecuadamente el cable, al igual que lo anterior la pantalla indicará que se revise la configuración o la conexión realizada.

Para establecer el control de lazo cerrado primero se definió el concepto general de funcionamiento partiendo de la teoría de control digital ya que no se iban a tomar las muestras por medio de señales análogas si no por el contrario la toma de muestras se realizaría con señales discretas hablando específicamente del tiempo como se indica en la gráfica 4.

Gráfica 4. Tiempo de señales discretas.



Presentación propia del autor.

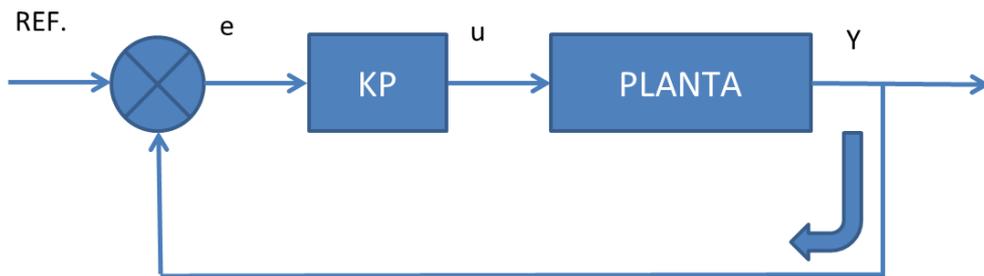
La captura de muestras como se observa en la gráfica 4 se realiza por intervalos de tiempo manteniendo la señal de tensión en un tiempo T1 un tiempo T2 así sucesivamente.

Es así como partiendo de lo anterior se estaría preguntando el valor de temperatura de salida del intercambiador en determinados instantes de tiempo y al mismo tiempo se estaría enviando la señal de control correspondiente para que la planta actué.

Ahora bien para aplicar la señal de control PID se identifica el funcionamiento teórico partiendo del esquema de bloques como se observa en la imagen 84, donde se identifica la entrada de referencia en este caso el valor Setpoint, el error, la entrada de control a la planta y una salida Y que es el lazo de alimentación obtenido por medio del sensor es así que se obtendría que el error sería la diferencia entre el valor de referencia y la medición del sensor en un instante de tiempo.

Sin embargo, algo que identificamos es que este es un proceso de enfriamiento a lo cual la obtención del error sería la diferencia de la medición y el valor de referencia obteniendo la ecuación de la salida de control $U = KP (Y[K]-Ref.)$.

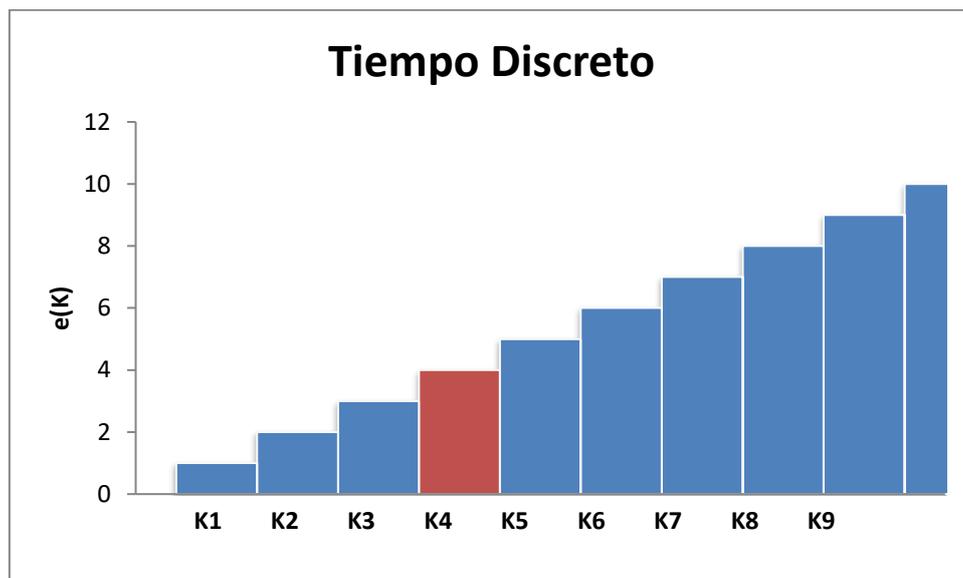
Imagen 82. Esquema de bloques ganancia proporcional.



Presentación propia del autor.

Ya establecido lo anterior tendríamos que ver ahora el valor de K_i una integral pero en tiempo discreto realizando una aproximación para el cálculo del área entre la toma de distintas muestras como se observa en la gráfica 5 entonces es decir que el error en un determinado tiempo es $e(K_5) \cdot T$, donde T (tiempo de muestreo) sería la diferencia entre $K_5 - K_4$.

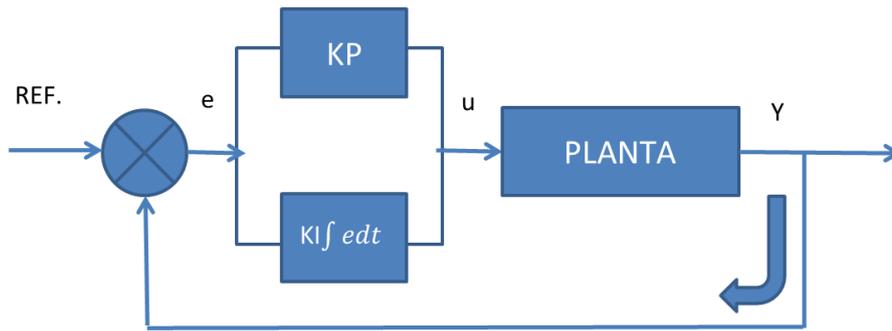
Gráfica 5. Toma de muestras tiempo discreto.



Presentación propia del autor.

Pero en este ejemplo se estaría evaluando solo el área en un cuadrante, es por eso por lo que se debía evaluar también las áreas anteriores que se iban obteniendo para así hallar el área bajo la curva completa, la solución a este partiría de la suma del área del error anterior quedando como resultado la ecuación $e(K) = e(K) \cdot T + e(K-1)$ siendo esta una aproximación a la integral. En la imagen 83 se puede evidenciar el diagrama de bloques en donde se evidencia el error y las dos ganancias en el sistema.

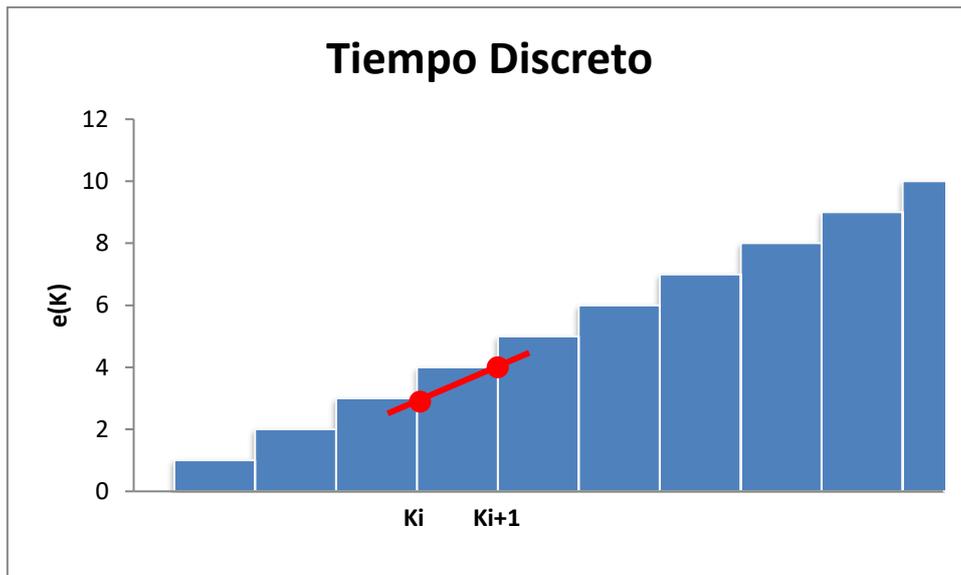
Imagen 83. Diagrama de bloques ganancia KP Y KI



Presentación propia del autor.

Ahora para calcular la función derivativa partimos del concepto teórico que nos indica que es el cálculo de la pendiente de la curva, pero en tiempo discreto se tendría que aproximar ese valor de la derivada como se muestra en la gráfica 6.

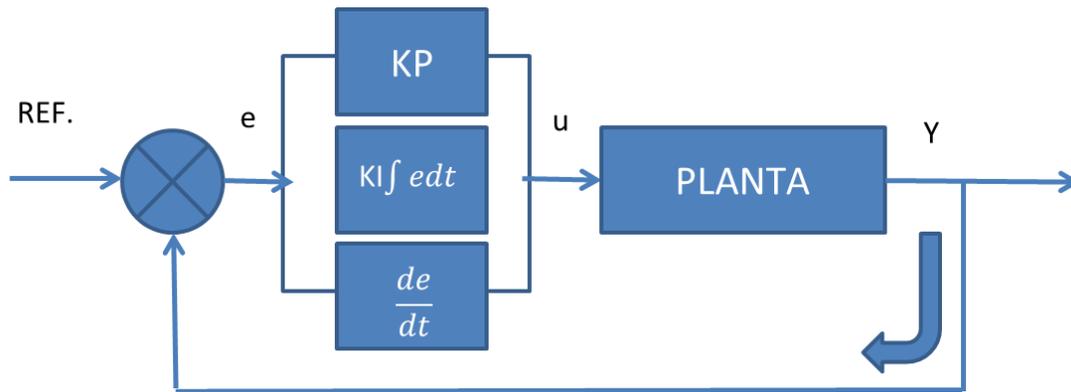
Gráfica 6. Tiempo discreto.



Presentación propia del autor.

En a la imagen 84 se observa el diagrama de bloques con las ganancias proporcional, derivativa e integral. Esto daría como resultado que el error en el instante de tiempo actual $e(K_{i+1})$ restando el error en el tiempo pasado todo esto sobre el tiempo de muestreo obtendríamos la aproximación del valor de la derivada dando como resultado la salida de control $D = K_D * ((e(K_{i+1}) - e(K_i)) / T)$.

Imagen 84. Entradas KP, KI Y KD.



Presentación propia del autor.

Ya obtenidos los tres valores se tiene que el valor total de entrada a la planta $U = P + I + D$, el cual fue enviado al parámetro del PWM programado en el PLC pues este sería el encargado de la activación de la bomba de agua caliente.

Ya programado todo el control por medio de la macro en la HMI, surgió un problema al momento de programar el tiempo de muestreo pues dentro de las funciones internas de la HMI se encontraba una función llamada TIME () la cual realiza un conteo se y se utilizó para este, sin embargo al momento de visualizar el conteo en pantalla se evidencio que el este comenzaba a contar conforme se encendía la pantalla y no cuando se daba la instrucción de encendido general del lazo de control por medio de la memoria M70.

Ahora bien para asegurar un tiempo de muestro optimo se utilizó un contador C0 accionado por la memoria M1013 que envía flancos cada 1 Segundo y enviado a un parámetro interno de la pantalla HMI ($\$12 = \{\text{Link1}\}1@PLC_C0$); Sin embargo ya solucionando el tiempo de muestreo surgió un problema con los valores obtenidos del PID pues este superaba los valores de tiempo que se establecían en el PWM y esto generaba inconvenientes a la salida de la bomba pues estos valores detenían el proceso de la activación de la bomba, así que fue necesario condicionar los valores de saturación de la señal de control enviada a la instrucción del PWM como se muestra en la imagen 85 la cual permitido asignar el valor máximo del tiempo para el encendido de la bomba a la salida PWM solo cuando el valor del PID superar el umbral del mismo.

Imagen 85. Instrucción PWM.

```
#LIMITES DE SATURACION DE LA SEÑAL DE CONTROL SI ES MAYOR AL TIEMPO
PWM
IF {Link1}1@PLC_D500 > {Link1}1@PLC_D400
#TIEMPO PWM MAXIMO
  {Link1}1@PLC_D500 = {Link1}1@PLC_D400
ENDIF
```

Presentación propia del autor

Seguido a esto se obtiene un modelo de la función de transferencia del sistema por medio de los datos experimentales obtenidos aplicando una respuesta dinámica del sistema a un cambio escalón; para la obtención de estos se implementaron en la HMI unas herramientas que permitían evidenciar y graficar los valores de temperatura de salida del intercambiador de calor, estos valores se permitían exportar en un archivo plano csv y realizar el respectivo análisis:

1. Al realizar la primera prueba con valor de temperatura del agua dentro del tanque 40 °C, y una temperatura de salida del sensor en 19.8 °C (temperatura ambiente), se abre la válvula de paso de agua y se evidencia que el intercambiador sin necesidad de recircular agua fría baja la temperatura del agua a tal punto de establecerse en un valor continuo de 22°C.
2. Aplicando el escalón unitario de $t = 800$ a $t = 1000$ (T periodo ms) a la bomba de agua fría, este procedimiento hecho por medio del control manual de cada bomba variando los parámetros del PWM en el apartado de configuración; permitiendo así bajar el valor de temperatura del agua de 22°C a 20 °C.

Estos valores exportados se llevan al software Matlab y seguido de una serie de pasos se obtienen las gráficas correspondientes al valor de temperatura y el cambio escalón, mismas que se obtuvieron en el anexo del archivo csv como se evidencio en la imagen 29; ya realizando el siguiente paso en la herramienta process models se estimó una función de transferencia la cual se caracterizó como un sistema de primer orden ya que se caracteriza bajo los siguientes conceptos:

- Es un sistema de control que puede representar un sistema RC, mecánico o un sistema térmico.
- Presenta como tal un diagrama de bloques simplificado. (Imagen 86).

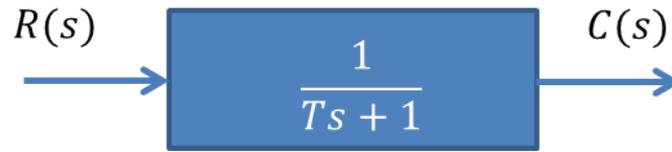
Imagen 86. Diagrama de bloque simplificado.



Presentación propia del autor.

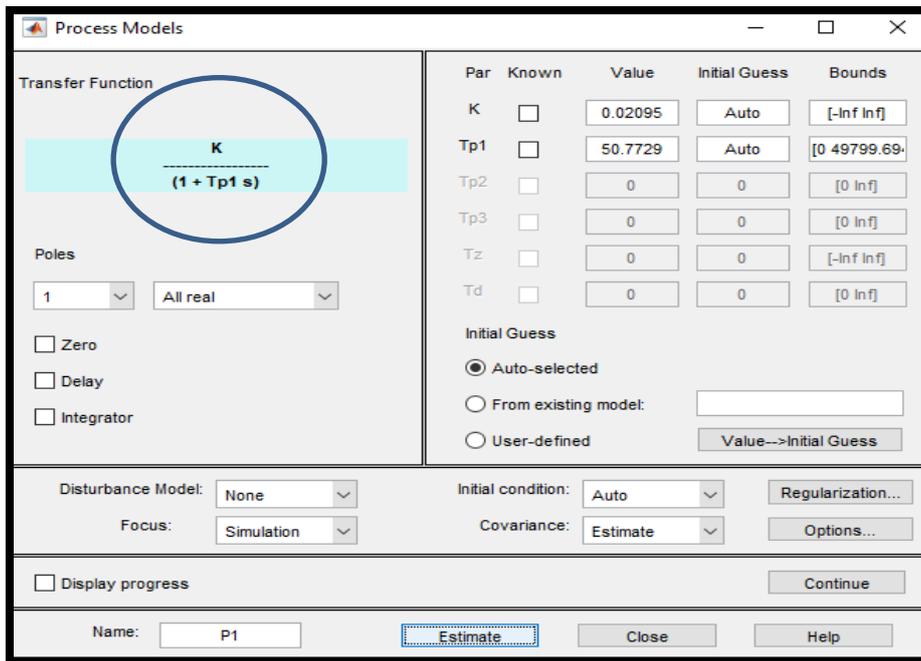
- Donde sabemos que la respuesta en el tiempo de la salida del sistema de control. (Imagen 87).

Imagen 87. Respuesta del tiempo de salida.



Presentación propia del autor.

Imagen 88. Valores estimados de Matlab.



Presentación propia del autor

En la imagen 88 es donde se puede observar que Matlab estima los valores K (0.02095) y T (50.7729) a partir de las tablas ingresadas.

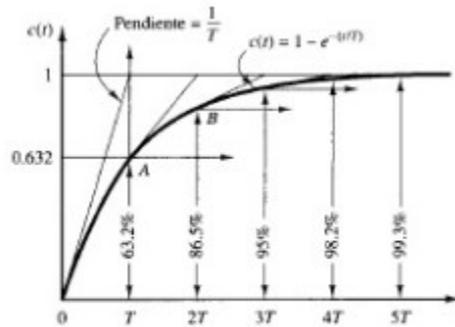
Y ahora al aplicar la entrada de tipo escalón y pasarlo la función al dominio del tiempo se obtiene:

$$C(s) = \frac{1}{s} * \frac{1}{s + \left(\frac{1}{T}\right)}$$

$$C(s) = 1 - e^{-t/T}$$

Ahora bien, lo que se pretende con lo anterior es mirar en qué momento la función se estabiliza y esto se hace a partir de la gráfica 7.

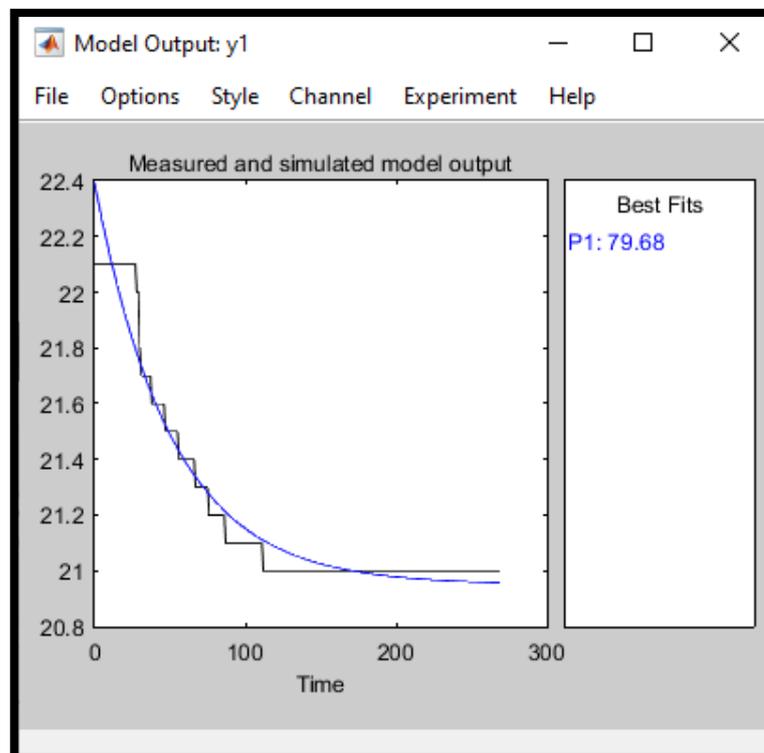
Gráfica 7, Constante de tiempo.



Constante de tiempo, es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar del 63.2% de su cambio total.

[Citado el 11 de octubre de 2019] Disponible en < <http://3.bp.blogspot.com/-DwXO1OfSMfo/VfnJpJRIul/AAAAAAAAAnY/2V-c9Fa3OGw/s1600/haberle%25C5%259Fme%2Bpinler.PNG> >

Imagen 89. Valor de estabilidad.



Presentación propia del autor.

Obteniendo un valor de estabilidad aproximado de 79.68%. (Imagen 89)

- Es aquí donde aplicamos el control PID a la planta que es lo que estima el Matlab basado en los datos experimentales identificados.

Imagen 90. Aplicación Control PID.

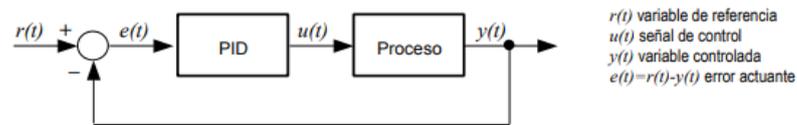


Fig. 1.1. Lazo de control realimentado.

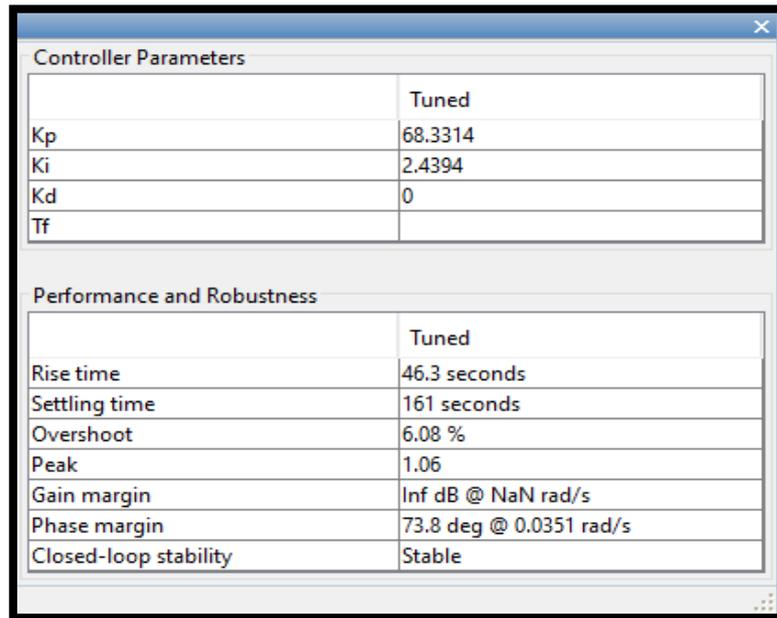
El algoritmo *teórico* elemental del controlador PID es:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

[Citado el 11 de octubre de 2019] Disponible en < <http://3.bp.blogspot.com/-DwXO1OfSMfo/vfnJpPJRIul/AAAAAAAAAnY/2V-c9Fa3OGw/s1600/haberle%25C5%259Fme%2Bpinler.PNG> >

- PID Tunner Matlab permitió encontrara la función de transferencia de primer orden del sistema obtenido como resultados los valores de KP= 68.33, KI= 2.43 Y KD= 0, donde la señal de control resulta entonces igual a la suma de tres términos: el término P (que es proporcional al error), el término I (proporcional a la integral del error) y el término D (que es proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son la ganancia proporcional K, el tiempo de integración T_i y el tiempo de derivación T_d , siendo este el procedimiento realizado en el programa que establecimos en el control en la macro HMI. (Imagen 90.)

Imagen 91. Control HMI.



The image shows a software window titled 'Controller Parameters' with a close button in the top right corner. It contains two tables. The first table, under the heading 'Tuned', lists PID parameters: Kp (68.3314), Ki (2.4394), Kd (0), and Tf. The second table, under the heading 'Performance and Robustness', lists system performance metrics: Rise time (46.3 seconds), Settling time (161 seconds), Overshoot (6.08 %), Peak (1.06), Gain margin (Inf dB @ NaN rad/s), Phase margin (73.8 deg @ 0.0351 rad/s), and Closed-loop stability (Stable).

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	68.3314
Ki	2.4394
Kd	0
Tf	

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	46.3 seconds
Settling time	161 seconds
Overshoot	6.08 %
Peak	1.06
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	73.8 deg @ 0.0351 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Presentación propia del autor.

Se programa por medio del software WPLSoft el funcionamiento lógico del sistema haciendo en las unas líneas de condigo ladder el accionamiento manual de las bombas de agua fría y caliente, teniendo en cuenta los aspectos seguridad para la detención del proceso tanto en automático como manual, haciendo uso del paro de emergencia.

Se desarrolla la interfaz gráfica del sistema por medio del software DOPSoft donde se pude navegar en 4 áreas del sistema como lo son el control de temperatura, el lazo de control abierto, el lazo de control cerrado y PWM permitiendo la visualización en tiempo real del valor de temperaturas y estado de memorias directas al PLC.

Se lleva a cabo la prueba de funcionamiento del equipo de modo manual y automático, se realizan ajustes físicos de ubicación de termocuplas y ajustes de software cambiando parámetros S3+4 a S3+3 del PID PLC ya que según en el manual cuando se acentúa el sistema cambia automáticamente de parámetro.

La implementación del sistema automatizado permite generar una guía de laboratorio del funcionamiento del equipo y dos guías para el establecimiento de un protocolo de comunicación.

1. A través de la investigación del funcionamiento del intercambiador y haciendo uso de la tesis del diseño del intercambiador, se logra caracterizar tanto el funcionamiento teórico, como los elementos físicos que interviene en la estructura.
2. Se realiza el diseño de potencia, control y comunicación para la automatización del sistema por medio del software de diseño AutoCAD.
3. Se realiza el montaje y cableado de los elementos eléctricos en el gabinete teniendo en cuenta el diseño eléctrico de potencia, control y comunicación RS-485 según planimetría.
4. Se establece protocolo de comunicación interfaz (RS-485), Data (7 bits), Stop Bits (1 Bits), Baud Rate (9600) y Parity Bits (Even) Delta controler MobBUS RTU para el COM 1 donde se enlazan con el PLC (Dirección 1) y los controles de temperatura (Dirección 2 Temperatura de salida agua caliente, 3 Temperatura tanque agua caliente y Temperatura Salida agua fría).
5. Se programa un lazo de control PID de manera experimental haciendo uso de las herramientas de obtención de datos y graficas de la HMI donde se anexan los resultados, Matlab donde permitió encontrara la función de transferencia de primer orden del sistema obtenido como resultados los valores de $KP= 68.33$, $KI= 2.43$ Y $KD= 0$ para finalmente incorporar un sistema de control PID automático por medio del WIZARD PID del PLC para el funcionamiento y adaptación del mismo en el proceso de funcionamiento del intercambiador.
6. Se Programa por medio del software WPLSoft el funcionamiento lógico del sistema haciendo en las unas líneas de condigo ladder el accionamiento manual de las bombas de agua y fría y caliente, teniendo en cuenta los aspectos seguridad para la detención del proceso tanto en automático como en manual haciendo uso del paro de emergencia.
7. Se desarrolla la interfaz gráfica del sistema por medio del software DOPSoft donde se pude navegar en 4 áreas del sistema como lo son el control de temperatura, el lazo de control abierto, el lazo de control cerrado y PWM permitiendo la visualización en tiempo real del valor de temperaturas y estado de memorias directas al PLC.
8. Se lleva a cabo la prueba de funcionamiento del equipo de modo manual y automático y se realizan ajustes físicos de ubicación de termocuplas y ajustes de software cambiando parámetros S3+4 a S3+3 del PID PLC ya que según en el manual cuando se acentúa el sistema el cambia automáticamente de parámetro.
9. La implementación del sistema automatizado permite generar una guía de laboratorio del funcionamiento del equipo y dos guías para el establecimiento de un protocolo de comunicación.

9 CONCLUSIONES

1. Se obtiene información del diseño conceptual del prototipo, bajo los criterios de diseño e investigaciones realizadas por el proyecto de tesis anterior, el cual se encargó de construir el intercambiador de tubos concéntricos; a partir del prototipo se caracteriza cada uno de los elementos y se verifica que el diseño estructural está hecho para soportar dos baldes que contienen el agua fría y caliente, como también el intercambiador de calor.

Por otro lado identifican los materiales, especificando características y dimensiones que sirvieron de acople para la interconexión de los elementos (Te, manguera, racores...) que comprende el sistema de intercambio de calor como tal; así mismo se especifica el diseño del intercambiador el cual al analizar el marco teórico se determinan que es de tipo concéntrico además de una serie de ecuaciones que generalizan el funcionamiento del intercambiador de calor de forma teórica las cuales fueron tomadas para la caracterización y construcción del prototipo logrando un volumen de agua interno de 304 cm^3 y un volumen de agua externo de 993 cm^3 .

2. Con ayuda del Software de Diseño AutoCAD se realiza el diseño eléctrico del funcionamiento del sistema automatizado, esto porque brinda una interfaz de dibujo amigable con el usuario, además de algunas librerías con elementos ya diseñados, como también que muchos de los elementos eléctricos de la marca DELTA ya están esquematizados y solo basta con descargarlos de la página; se ejecuta primero el esquema de potencia indicando tanto los elementos que allí intervienen como también características básicas de voltaje de alimentación y corriente de consumo.

Así mismo se realiza el plano de control donde se indican las entradas y salidas que intervienen en el circuito y también se esquematiza y detalla el sistema de comunicación y protocolo utilizado, el cual fue realizado prácticamente cuando se logró programar la comunicación de los elementos, esto con el fin de determinar el puerto y dirección correspondiente.

Finalmente se determinan todos los elementos de potencia y control que intervienen en el circuito especificando marca y características propias del producto, además de algunos anexos donde se encuentran manuales e instructivos de instalación.

3. Una vez realizado el diseño eléctrico, se procede a la implementación, por un lado, se hace la perforación del gabinete teniendo en cuenta la posición de la pantalla, elementos de control para el usuario y salidas a los elementos de medición; por otro lado, se hace el montaje de la canaleta de $25 \times 40 \text{ mm}$ y el riel omega por donde se ubican los cables y se montan los elementos eléctricos.

Este procedimiento se hizo con ayuda de maquinaria manual como taladro, caladora, pulidora y elementos de medición como metro y regla, buscando la ergonomía del usuario al momento de interactuar con el tablero eléctrico.

4. Se realiza el cableado de comunicación RS-485 por medio de cable UTP categoría 6 comunicando PLC, HMI y DTC esto porque brinda una protección contra interferencias a campos magnéticos o ruido que interfieran en la señal de comunicación. Por otro lado, haciendo uso de las tablas (Cables y Alambres CELTELSA) se determina el cable para la alimentación de cada elemento eléctricos y los elementos de control según el plano diseñado, lo cual indica un No.18 AWG (3.20 A) y un encauchetado 2x18" para cada motor suficiente para una potencia de 25 W a 12 VDC.

Cabe recalcar que también se hace uso de la norma RETIE para determinar algunos parámetros básicos de instalación como lo son la identificación de los cables con una debida marcación (En este caso números de agarre Legrand y números DEXSON), además de la debida identificación de colores del cable de alimentación de las fases (Blanco y Negro) y fuentes de alimentación tanto para 12 y 24 VDC (Rojo positivo y Negro negativo).

5. Se estableció por medio del software DOPSoft el protocolo de comunicación por el COM1 para la pantalla HMI en la ventana de herramientas (Communication Settings) en la cual le indica al programador que ingrese la interfaz, data bits, stop bits, baud rate y parity bits a lo cual queda implementa para cada elementos como RS485 por WPLSoft se establecen los paramentos del PLC moviendo registros por medio de la programación ladder y teniendo presente el manual de programación y finalmente haciendo uso del programa DTCOM se configurar los registros de comunicación manualmente para cada control de temperatura.

6. Para el desarrollo del PID se hace uso del software MATLAB ya que cuenta con una serie de herramientas para la obtención de la función de transferencia a partir de datos experimentales con una respuesta dinámica del sistema a un cambio escalón, para eso primero se obtuvieron los datos programando por medio de la pantalla HMI una serie de gráficas donde se direccionan el valor de temperatura de salida del agua caliente y la salida PWM aplicada al motor, se obtienen los datos en un archivo plano de Excel los cuales permitieron realizar las dos graficas respectivas, estas dos pantallas se realizan en un apartado interno de la HMI los cuales solo se pueden ver descargando el programa en la PC.

Ya con la hoja de datos y haciendo uso del software MATLAB se obtiene de igual manera las gráficas anteriores como también la gráfica modelo para establecer el Setpoint de temperatura (VS), además la función de transferencia adecuada que modela el sistema y así finalmente por medio de la herramienta PIDTOOLS los valores obtenidos de KP, KI y TD.

Haciendo uso del programa del PLC se realiza la programación lógica del sistema identificando las entradas y salidas del control, y con lo anterior se realiza el programa de control PID con la función Wizard PID y moviendo unos registros de control según el manual de programación del PLC en el apartado PID para que este se ajuste y determine de manera automática.

Ya que el PLC no realiza operaciones matemáticas, por medio de la pantalla HMI y aprovechando que esta sirve como puente para la obtención los valores de temperatura, se programa una macro para que realice dichas operaciones y así se obtuvieron el valor de P (error proporcional) , I (el área aproximada en cada toma de muestra) y D (la diferencia de errores en cada muestra) los cuales fueron enviados al registro del PLC el cual va dirigido a la salida PWM programada en el PLC, logrando así que el ajuste además de automático de PID del PLC implementado, el usuario pueda interactuar cambiando los valores de KP, KI y KD hasta encontrar el ajuste adecuado según los datos de SetPoint ingresados.

7. Se programa una serie de líneas de código en el PLC para el accionamiento manual de cada bomba, direccionando cada botón de la pantalla HMI (M53 Bomba agua fría y M54 Bomba agua caliente) en serie a cada salida del PLC Y0 Y Y1 respectivamente, en una página de la pantalla HMI llamada control abierto, con esta interfaz y la programación implementada se logró accionar cada bomba, estas funciones se realizaron a la par de la programación de la interfaz de la pantalla.

8. Gracias al programa de HMI DOPSoft se realiza la interfaz gráfica teniendo en cuenta distintas paginas donde se encuentran el control de temperatura, lazo de control abierto, lazo de control cerrado y PWM, en este se leen los parámetros de comunicación de temperatura y los accionamientos direccionados al PLC y todos estos basados en los manuales de operación de cada elemento respectivamente.

Así mismo se buscó que la interfaz implementada fuera amigable con el usuario cumpliendo a cabalidad con esto, ya que cada modo de funcionamiento y apartado de configuraciones están separadas por botones (configuración de temperatura, control lazo abierto, control lazo cerrado y PWM) que redirigen a una pantalla en específico según cada función designada.

9. Los ajustes físicos llevados a cabo fueron la ubicación adecuada de los sensores de temperatura ya que por un momento no realizaban una lectura óptima y con respecto al software se configuran los parámetros de lectura de la temperatura para el entendimiento del usuario y el cambio de parámetro S3 del PLC para el funcionamiento automático del PID. La prueba de funcionamiento se realiza obteniendo el valor deseado de temperatura.

10. Se realiza un manual de funcionamiento del equipo mostrando paso a paso el uso de la pantalla y la puesta en marcha del equipo, así mismo se hacen dos guías de laboratorio donde en una se muestra de manera detallada como se establece un protocolo de comunicación con el PLC, HMI, DTC y en la otra se muestra cómo se realiza la programación de un control de lazo cerrado y abierto por medio del PLC.

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] Mario Osvaldo Bressano, M. O. B. Ing.. (s.f.-a). Evolución Histórica de la Automatización de los Procesos Industriales. Recuperado 17 septiembre, 2019, de http://members.tripod.com/iua_informatica.ar/informatica_industrial/download/historia.pdf
- [2] Mario Osvaldo Bressano, M. O. B. Ing.. (s.f.-a). Evolución Histórica de la Automatización de los Procesos Industriales. Recuperado 17 septiembre, 2019, de http://members.tripod.com/iua_informatica.ar/informatica_industrial/download/historia.pdf
- [3] MÁSTER DEGREE: Ingeniería de Sistemas Industriales. (s.f.). Recuperado 17 septiembre, 2019, de http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf
- [4] MÁSTER DEGREE: Ingeniería de Sistemas Industriales. (s.f.). Recuperado 17 septiembre, 2019, de http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf
- [5] Vicente Guerrero Jimenez, V. G. J. (2009). Comunicaciones Industriales (Ed. rev.).
- [6] Alberto Mayor Mora, A. M. M. (s.f.). El nacimiento de la industria colombiana. Recuperado 17 septiembre, 2019, de <http://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-151/el-nacimiento-de-la-industria-colombiana>
- [7] IBM 650: La primera computadora que llegó a Colombia hace 60 años. (2017, 13 marzo). Recuperado 17 septiembre, 2019, de <https://www.dinero.com/emprendimiento/articulo/primera-computadora-que-llego-a-colombia-hace-60-anos/242630>
- [8] Sin marcha atrás: La automatización será una realidad en Colombia en 2020. (2017, 13 marzo). Recuperado 17 septiembre, 2019, de <https://www.dinero.com/emprendimiento/articulo/automatizacion-en-las-empresas-colombianas-en-el-2020-segun-deloitte/242846>
- [9] 2020. *MASTER DEGREE: Ingeniería De Sistemas Industriales*. 1st ed. [ebook] LIFELOG LEARNING, p.1. Available at: http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf [Accessed 17 September 2019].pdf

[10] Tacconi, E., Mantz, R., Solsona, J., & Puleston, P. (2005). *Controladores Basados en Estrategias PID* [Ebook] (p. 2). Tania Salazar y Ana Roquez. Retrieved from https://www.academia.edu/8644298/Controladores_Basados_en_Estrategias_PID.pdf

[11] LIFELOG LEARNING. (2020). *MASTER DEGREE: Ingeniería de Sistemas Industriales* [Ebook] (1st ed., p. 1). Retrieved from http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf

[12] Aguirre Grazio, I. (2017). *PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN INDUSTRIALES* [Ebook] (p. 5). UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMAN. Retrieved from <https://docplayer.es/52037840-Sistemas-de-control-automatas-programables-p-l-c-ing-david-jorge-aguirre-grazio-catedra-de-sistemas-de-control-departamento-de-ing.html>.

[13] Núñez, I. (2017). *Lazos de control* [Ebook] (p. 1). Teresa Henríquez Córdoba. Retrieved from <https://docplayer.es/33950261-Lazos-de-control-lazos-de-control-ing-leni-nunez.html>.

[14] SMC international training
<https://www.smctraining.com/es/webpage/indexpage/311>

[15][https://www.logicbus.com.mx/Modbus.php#:~:text=Modbus%20es%20un%20protocolo%20de,controladores%20%C3%B3gicos%20programables%20\(PLCs\).&text=Existen%20versiones%20del%20protocolo%20Modbus,Ethernet%20\(Modbus%2FTCP\)](https://www.logicbus.com.mx/Modbus.php#:~:text=Modbus%20es%20un%20protocolo%20de,controladores%20%C3%B3gicos%20programables%20(PLCs).&text=Existen%20versiones%20del%20protocolo%20Modbus,Ethernet%20(Modbus%2FTCP)).

[16] Georgy Populan, Florencio Sanchez Silva Manual para cálculo de intercambiador de calor y bancos de tubos aleatados <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>

11 ANEXOS

11.1. ANEXO A. MANUAL DE USUARIO INTERCAMBIADOR DE CALOR.

11.2. ANEXO B. PRACTICA PORTOCOLO DE COMUNICACIÓN.

11.3. ANEXO C. PRACTICA PROGRAMACION LAZO CERRADO.

11.4. ANEXO D. MANUALES DE EQUIPOS.

11.2.1. ANEXO D1. MANUAL DE PLC DVP.

- <http://www.deltaww.com/filecenter/Products/download/06/060301/Manual/DELTA IA-PLC DVP-ES2-EX2-SS2-SA2-SX2-SE-TP PM EN 20170426.pdf>.

11.2.2. ANEXO D2. MANUAL DTC CONTROL DE TEMPERATURA.

- http://www.deltronics.ru/images/catalogue/DT_C_EN_20160204.pdf.

11.2.3. ANEXO D3. MANUAL HMI DELTA DOP.

- <http://www.deltronics.ru/images/manual/DOPSoft UM EN 20181101.pdf>.

11.5. ANEXO E. DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CONTROL DE TEMPERATURA Y CAUDAL P.I.D. EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DIDACTICO PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.

11.6. ANEXO F PLANOS.

11.5.1. ANEXO F1. PLANO POTENCIA.

11.5.2. ANEXO F2. PLANO CONTROL.

11.5.3. ANEXO F3. PLANO COMUNICACIÓN.

11.5.4. ANEXO F4. CÓDIGO PID EN MACRO HMI

11.7. ANEXO G. DATOS TEMPERATURA SALIDA INTERCAMBIADOR.